



①9 **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 02 626 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7:
G 02 B 17/08
G 02 B 1/02
G 02 B 21/04
G 03 F 7/20

②1 Aktenzeichen: 100 02 626.5
②2 Anmeldetag: 22. 1. 2000
④3 Offenlegungstag: 26. 7. 2001

DE 100 02 626 A 1

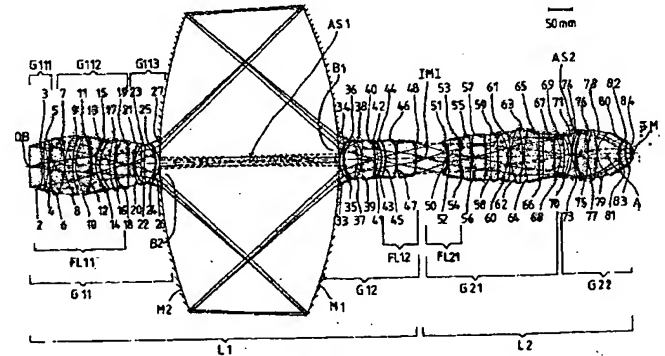
⑦1 Anmelder:
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

⑦2 Erfinder:
Schuster, Karl-Heinz, 89551 Königsbronn, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 **Katadioptrisches Objektiv mit Asphären**

⑤7 Ein asphärisches Reduktionsobjektiv mit einem katadioptrischen Teilobjektiv (L1), einem Zwischenbild (IMI) und einem refraktiven Teilobjektiv (L2). Das katadioptrische Teilobjektiv weist einen zur optischen Achse zentrierten Aufbau mit zwei einander zugewandten Konkavspiegeln (M1, M2) auf. Die Aussparungen in den Spiegeln (B1, B2) führen zu einer Aperturobskuration, die durch den Einsatz von spiegelnahen Linsen mit hoher negativer Brechkraft und asphärischen Linsenflächen (27, 33) sehr klein gehalten werden kann. Mit asphärischen Linsenflächen (12, 48, 53) in den Feldlinsengruppen kann die Lage der Eintritts- und Austrittspupille korrigiert werden. Sphärische Linsen im refraktiven Teilobjektiv können mit symmetrisch zur Blendenebene angeordneten asphärischen Linsenflächen (66, 78) eingespart werden. Weitere Korrektionsmöglichkeiten bilden benachbarte asphärische Linsenflächen (172, 173).



DE 100 02 626 A 1

Die Erfindung betrifft ein katadioptrisches Objektiv und dessen Verwendung in einem Mikroskop oder in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage. Das katadioptrische Objektiv besteht dabei aus sphärischen und asphärischen Linsenelementen und zwei einander zugewandten Konkavspiegeln. Alle Komponenten des katadioptrischen Objekts wie auch das Objekt- und Bildfeld sind zentriert zu einer geraden optischen Achse angeordnet. Diese Klasse von katadioptrischen Objektiven hat eine zentrale Aperturobskuration.

Bei Wellenlängen im tiefen DUV-Bereich, also Wellenlängen kleiner 250 nm, werden Konkavspiegel mit positiver Brechkraft in Kombination mit Linsen negativer Brechkraft als geeignete Mittel zur Farbkorrektion eingesetzt.

Aus der Offenlegungsschrift DE 196 39 586 ist ein gattungsgemäßes katadioptrisches Reduktionsobjektiv bekannt. Das Reduktionsobjektiv besteht aus einem katadioptrischen ersten Teilobjektiv mit zwei einander zugewandten Konkavspiegeln, einer Zwischenbildebene und einem refraktiven zweiten Teilobjektiv. Mit den asphärischen Konkavspiegeln und den sphärischen Linsen konnte bei einer Apertur von $NA = 0,70$ und einem Bildfelddurchmesser von 27,0 mm die zentrale Abschattung nur auf ca. 35% des Spiegeldurchmessers reduziert werden, so daß die Kontrastübertragungsfunktion schon deutlich beeinträchtigt wird. Ungünstig für die Größe der Aperturobskuration sind die Linsen der ersten Linsengruppe, die sich zwischen den beiden Konkavspiegeln befinden.

Zur Korrektur von Restfehlern sind in der Nähe der auf die Zwischenbildebene folgende Blendenebene nicht sphärische Korrekturflächen vorgesehen. Deren Form hängt von den Restfehlern des Einzelexemplars ab, so daß die asphärischen Korrekturflächen nicht Bestandteil des Objektivdesigns sind.

Da bei Wellenlängen kleiner 200 nm auch Fluoridkristalle zum Einsatz kommen und diese Materialien in der geforderten Qualität und Größe nur begrenzt zur Verfügung stehen, ist es erstrebenswert, Mittel zu finden, um die Linsendurchmesser noch weiter reduzieren zu können.

Aus der SU 124665 ist ein katadioptrisches Mikroskopobjektiv mit zwei einander zugewandten Konkavspiegeln bekannt. Die 60-fache Vergrößerung des katadioptrischen Mikroskopobjektives wird ohne eine Zwischenabbildung erreicht. Aufgrund der geringen Feldgröße sind zur Korrektur nur wenige sphärische Linsen erforderlich. Zur Farbkorrektur wird neben den Spiegeln ein Kittglied eingesetzt. Dieses Korrektionsmittel ist jedoch im tiefen DUV-Wellenlängenbereich nicht mehr verfügbar.

Katadioptrische Objektive für die Mikrolithographie mit nur einem Konkavspiegel sind aus der US-A-5,691,802 oder der EP-A-0 475 020 bekannt geworden. Bei diesen Systemen muß die optische Achse zumindestens einmal abgelenkt werden. Sollen Retikel und Wafer parallel zueinander angeordnet sein, ist eine zweifache Strahlumlenkung erforderlich. Dies führt zu einem hohen konstruktiven Aufwand. Verwendet man zudem einen rein reflektiven Strahlteiler wie in der US-A-5,691,802, so können nur außeraxiale Objektfelder abgebildet werden. Dabei werden die feldnahen Linsen des Objektives unsymmetrisch ausgeleuchtet, wodurch aufgrund der Absorption der Linsen asymmetrische thermische Verformungen und damit schwer korrigierbare Abbildungsfehler auftreten.

Eine zentrierte Anordnung der optischen Komponenten auf einer geraden optischen Achse mit zwei einander zugewandten Konkavspiegeln, wie in der DE 196 39 586 beschrieben, weist diese Nachteile nicht auf. Dagegen kommt es zu einer Aperturobskuration durch die Aussparungen in den Spiegeln.

In dem Artikel "Effect of central obscuration on image formation in projection lithography" von S. T. Yang et al. (SPIE Vol. 1264 Optical/Laser Microlithography III (1990) p. 477-485) werden die Auswirkungen einer Aperturobskuration auf die Kontrastübertragungsfunktion untersucht. Bei inkohärenter Beleuchtung wird für kleine Ortsfrequenzen im Vergleich zu einem unvignettierten System der Kontrast reduziert. Die Akzeptanz von obskurierten Objektiven kann deshalb beträchtlich erhöht werden, wenn die Aperturobskuration weiter verringert wird. Zudem muß aufgrund der nichtlinearen Antwortfunktion des Photolackes eine Reduktion der Kontrastübertragungsfunktion nicht unbedingt zu einer Reduzierung des Auflösungsvermögens im Lack führen. Durch geeignete Wahl des Photolackes kann der Einbruch in der Kontrastübertragungsfunktion immer noch oberhalb der Belichtungsschwelle des Photolackes liegen.

Aufgabe der Erfindung ist es, bei einem gattungsgemäßen Objektiv die Aperturobskuration und die Linsendurchmesser weiter zu verringern. Zusätzlich soll bei für die Mikrolithographie typischen Feldgrößen und einer gegenüber dem Stand der Technik weiteren Erhöhung der bildseitigen Apertur mit möglichst wenig Materialeinsatz eine hervorragende Bild- und Farbkorrektur erzielt werden.

Gelöst wird diese Aufgabe mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Die spezielle Ausgestaltung der Erfindung wird in den abhängigen Ansprüchen 2 bis 36 beschrieben. Die Ansprüche 1 bis 22 betreffen ein katadioptrisches Objektiv, das normalerweise als Teilobjektiv mit mindestens einem üblicherweise dioptrischen (rein refraktiven) Teilobjektiv zu einem Reduktionsobjektiv kombiniert wird. Die Kombination eines katadioptrischen Teilobjektives mit mindestens einem dioptrischen Teilobjektiv und die Verwendung in einem Mikroskop oder in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage wird in den Ansprüchen 23 bis 36 beschrieben.

In dem katadioptrischen Objektiv durchsetzen die Lichtstrahlen ausgehend von der Objektebene zunächst eine erste Linsengruppe mit negativer Brechkraft und treffen dann auf einen ersten Konkavspiegel, der zentriert ein Loch aufweist. Dieser Konkavspiegel ist konkav zur Objektebene angeordnet. Das Licht wird zurück reflektiert und trifft auf den zweiten Konkavspiegel, der ebenfalls ein zentrales Loch aufweist. Dieser zweite Konkavspiegel ist konkav zur Bildebene angeordnet. Somit sind die beiden Konkavspiegel einander zugewandt. Von diesem zweiten Konkavspiegel werden die Lichtstrahlen zurück reflektiert und durchsetzen, bevor sie auf die Bildebene dieses katadioptrischen (Teil-)Objektives treffen, eine zweite Linsengruppe mit negativer Brechkraft.

Die Aussparungen in den Spiegeln ermöglichen einen durchgehenden Strahlenverlauf, führen aber zu einer zentralen Obskuration in der Ausleuchtung der Blendenebene. Alle Strahlen, die bei der Reflektion an den Konkavspiegeln in den Bereich der Spiegelaussparungen treffen würden, tragen nicht zur Abbildung bei und müssen durch geeignete Maßnahmen vignettiert werden. Es tritt eine Obskuration der Aperturstrahlen auf. Als Aperturstrahlen werden die von einem Objektpunkt ausgehenden Strahlen bezeichnet, die innerhalb des von der Systemblende begrenzten Strahlenbüschels liegen.

Die erste Linsengruppe, die beiden Konkavspiegel und die zweite Linsengruppe sind zentriert zu einer gemeinsamen,

eine Gerade bildenden, optischen Achse angeordnet. Durch den gezielten Einsatz asphärischer Flächen lassen sich die Aperturobskuration und der Materialeinsatz für die Linsen weiter verringern.

Bei Verwendung mit einem oder mehreren Teilobjektiven zeigt das von diesem katadioptrischen Objektiv erzeugte (Zwischen-)Bild starke Aberrationen, die in Kombination mit dem/den weiteren Objektiv(en) im (Gesamt-)Bild dann ausgeglichen werden. Insbesondere soll das katadioptrische Objektiv eine chromatische Überkorrektur und/oder Überkorrektur der Petzvalsumme als Vorhalt zur Kombination mit dioptrischen Teilobjektiven aufweisen.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Linsenelemente direkt vor dem ersten Konkavspiegel und/oder die Linsenelemente direkt nach dem zweiten Konkavspiegel eine starke negative Brechkraft aufweisen. Dabei kann es sich um eine einzelne Negativlinse handeln, oder um mehrere Linsenelemente, die jedoch insgesamt eine negative Brechkraft aufweisen müssen. Es ist vorteilhaft, wenn diese Linsen mit negativer Brechkraft oder benachbarte Linsen asphärische Linsenflächen aufweisen. Diese Linsen mit negativer Brechkraft erzeugen eine chromatische Überkorrektur. Da bei einer Linse mit Brechkraft Φ und Randstrahlhöhe h_{RD} der Beitrag zur chromatischen Längsabweichung proportional zu $h_{RD}^2 \cdot \Phi$ ist und die Linsen mit negativer Brechkraft in der Nähe der Spiegel aufgrund der geforderten kleinen Aperturobskuration eine geringe Randstrahlhöhe aufweisen, muß die negative Brechkraft der Linsen um so höher sein, um eine ausreichende chromatische Überkorrektur zu erzielen.

Um die Hauptstrahlwinkel in der Objekt- und in der Bildebene beeinflussen zu können, ist es günstig, wenn die Linsen der objekt- und/oder bildseitigen Feldlinsengruppe mindestens eine asphärische Fläche aufweisen. Zur Feldlinsengruppe werden all diejenigen Linsen gezählt, innerhalb derer der Randstrahl eines Objektpunktes auf der optischen Achse zwischen optischer Achse und Hauptstrahl des äußersten Feldpunktes verläuft.

Ein weiteres Merkmal der Erfindung ist es, daß die erste Linsengruppe in drei Untergruppen aufgeteilt werden kann, wobei die mittlere Untergruppe eine positive Brechkraft aufweist, während die erste und dritte Untergruppe negative Brechkraft aufweisen. Für die Korrektur ist es günstig, wenn eine Linse der mittleren Untergruppe eine asphärische Fläche aufweist.

Um die Linsendurchmesser klein zu halten, werden vorteilhafterweise die Linsen der ersten und zweiten Linsengruppe nur in einer Richtung durchsetzt. Linsen, die mehrfach durchsetzt werden, müßten sich im Lichtweg zwischen den Konkavspiegeln befinden und entsprechend große Durchmesser aufweisen. Damit ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß sich die erste und/oder zweite Linsengruppe zum Teil in den Raum zwischen den Spiegeln erstreckt.

Liegt der Betrag des Abbildungsmaßstabes dieses Objektivs etwa zwischen 0,70 und 1,30, so läßt sich ein zur Blendenebene symmetrischer Aufbau für die Konkavspiegel und deren zentrale Aussparungen erzielen. Dadurch sind die Durchmesser der Aussparungen und damit deren Beiträge zur Aperturobskuration ähnlich groß. Liegt der Abbildungsmaßstab nicht in diesem Bereich, weisen die beiden Teilobjektive unterschiedliche Brennweiten auf und es ist deutlich schwieriger, die Durchmesser der Aussparungen gleich groß zu halten. Ein weiterer Vorteil eines Betrags des Abbildungsmaßstabes zwischen 0,7 und 1,3 und eines zur Blendenebene symmetrischen Aufbaus ist die Tatsache, daß asymmetrische Bildfehler wie beispielsweise Koma in niedriger Ordnung gut beherrscht werden können.

Die minimale Aperturobskuration erreicht man, wenn die letzte Linse der ersten Linsengruppe und die erste Linse der zweiten Linsengruppe jeweils im Bereich einer Spiegelaussparung angeordnet sind. Es ist also günstig, wenn sich einzelne Linsen, oder zumindest Linsenteile, im Bereich zwischen erstem und zweitem Konkavspiegel befinden.

In der ersten und/oder zweiten Linsengruppe wird vorteilhaft eine Konkavfläche vorgesehen, die einer Halbkugel sehr nahe kommt. Das Verhältnis von halbem Linsendurchmesser zum Radius der Fläche ist für diese Flächen größer 0,70. Die Konkavfläche der ersten Linsengruppe ist dabei der Objektebene, die Konkavfläche der zweiten Linsengruppe der Bildebene zugewandt. Durch diese sehr stark zerstreuen Flächen in der Nähe der Konkavspiegel wird erreicht, daß die Aperturobskuration sehr klein gehalten werden kann.

Es ist günstig, daß die Linse mit der Konkavfläche oder eine benachbarte Linse eine asphärische Linsenfläche aufweist. Gerade mit der asphärischen Fläche in der Nähe einer Linse mit hoher negativer Brechkraft kann die Aperturobskuration weiter reduziert werden.

Die maximale Umlenkung des Randstrahls innerhalb der ersten Linsengruppe und/oder innerhalb der zweiten Linsengruppe bei geringer Aperturobskuration erzielt man, wenn man eine ausgezeichnete Linsenfläche in der Nähe der Konkavspiegel derart auslegt, daß die Inzidenzwinkel der Randstrahlen bezogen auf die Flächennormale am jeweiligen Durchstoßpunkt maximale Werte annehmen. Die Inzidenzwinkel sind nach oben nur durch die Notwendigkeit einer für die jeweilige Arbeitswellenlänge angepaßten Anti-Reflex-Beschichtung und unerwünschte Polarisierungseffekte bei Inzidenzwinkeln nahe dem Brewsterwinkel limitiert. So ergeben sich für diese ausgezeichneten Linsenflächen Inzidenzwinkel, die auf jeden Fall größer sind als das dreifache der objektseitigen numerischen Apertur.

Gerade dann ist es günstig, wenn die Linse mit der stark winkelbelasteten Fläche oder eine benachbarte Linse eine asphärische Fläche aufweist. Damit lassen sich Aberrationen kompensieren, die auf die stark winkelbelastete Fläche zurückzuführen sind.

Durch die asphärischen Flächen und die Linsen mit hoher negativer Brechkraft in der Nähe der Konkavspiegel ist es möglich, die Aperturobskuration auf Werte unter 35%, sogar bis zu 20% zu reduzieren. Die Aperturobskuration ist definiert als das prozentuale Verhältnis aus dem Sinus des Strahlwinkels eines Strahls, der von einem Objektpunkt auf der optischen Achse ausgeht und auf den Rand des Spiegel Lochs gezielt wird, und dem Sinus des Strahlwinkels des Randstrahls des gleichen Objektpunktes. Die Strahlwinkel werden dabei bezüglich der optischen Achse bestimmt.

Ordnet man die Konkavspiegel vor und hinter der Blendenebene an, so liegen die Löcher der Spiegel beinahe symmetrisch zur Blendenebene. Durch diese Maßnahme kann die feldabhängige Aperturobskuration minimiert werden. Mit der Blendenebene zwischen den Konkavspiegeln schneiden die Hauptstrahlen die optische Achse nach der Reflektion am ersten Konkavspiegel und vor der Reflektion am zweiten Konkavspiegel.

Das katadioptrische Objektiv ist so ausgelegt, daß sich zwischen der ersten und zweiten Linsengruppe ein zur Blendenebene weitgehend symmetrischer Strahlverlauf ergibt, so daß sich die Strahlhöhe des von einem Objektpunkt auf der optischen Achse ausgehenden Randstrahls an der letzten Fläche der ersten Linsengruppe von der Strahlhöhe des gleichen Randstrahls an der ersten Fläche der zweiten Linsengruppe um maximal 20% unterscheidet.

Um die Aperturobskuration so klein wie möglich zu halten und die Baulänge des Objektives zu reduzieren, ist eine große Aperturaufweitung erforderlich. Betrachtet man einen Strahl, der in der Objektebene die optische Achse schneidet, so läßt sich die Aperturaufweitung als das Verhältnis des Sinus des Winkels **12** dieses Strahls nach der ersten Linsengruppe zu einem Sinus des Winkels **11** des gleichen Strahls vor der ersten Linsengruppe definieren. Die Winkel werden dabei jeweils bezüglich der optischen Achse bestimmt. Mit der negativen Brechkraft der ersten Linsengruppe kann die Aperturaufweitung

$$m = \frac{|\sin(i_2)|}{|\sin(i_1)|}$$

größer 2,0 eingestellt werden.

Mit asphärischen Flächen ist es möglich, die Aperturaufweitung abhängig vom Winkel des auf die erste Linsengruppe einfallenden Strahles zu steuern. Gerade bei sehr hohen Werten für die Aperturaufweitung und Linsen mit hoher negativer Brechkraft kommt es bei rein sphärischen Linsenflächen für die Randstrahlen zu einer deutlich höheren Aperturaufweitung wie zum Beispiel für einen Paraxialstrahl. Das Anwachsen der Aperturaufweitung mit zunehmendem Strahlwinkel führt zu größeren Spiegeldurchmessern und damit zu einer Erhöhung der Objektivaabmessungen. Durch asphärische Linsenflächen vor und nach den Konkavspiegeln kann die Aperturaufweitung winkelabhängig beeinflusst werden. Ziel ist es, daß für die Aperturaufweitung m_R für einen Randstrahl und für die Aperturaufweitung m_p für einen Paraxialstrahl das Verhältnis m_R/m_p kleiner 1,1, bevorzugt kleiner 1,05, ist. Die asphärischen Flächen vor und nach den Konkavspiegeln sind dabei so ausgelegt, daß der von der asphärischen Fläche der ersten Linsengruppe erzeugte Effekt von der asphärischen Fläche der zweiten Linsengruppe weitgehend kompensiert wird. Die Wirkung der asphärischen Flächen kann natürlich nicht völlig isoliert, sondern nur im Zusammenspiel mit den benachbarten Systemflächen betrachtet werden.

Mit der starken Aperturaufweitung der ersten Linsengruppe und der entsprechenden Aperturreduzierung der zweiten Linsengruppe können die Linsendurchmesser im Vergleich zu den Spiegeldurchmessern stark reduziert werden. Material, das im tiefen UV-Bereich transparent ist und große Durchmesser aufweist, ist sehr teuer und nur begrenzt verfügbar. Deshalb ist es günstig, wenn die maximalen Linsendurchmesser nur 20% bis 25% der Spiegeldurchmesser betragen.

Für die Ankopplung des katadioptrischen Objektives an das Beleuchtungssystem ist es vorteilhaft, wenn das katadioptrische Objektiv eine nahezu homozentrische Eintrittspupille aufweist. Als Maß kann die Abweichung der objektseitigen Pupillenfunktion von einer Ausgleichsgeraden durch diese Pupillenfunktion dienen. Unter der objektseitigen Pupillenfunktion versteht man den Verlauf der Tangens-Werte der Hauptstrahlwinkel in der Objektebene über die Durchstoßhöhen der Hauptstrahlen mit der Objektebene. Ein Objektiv mit einer homozentrischen Eintrittspupille würde eine lineare Pupillenfunktion aufweisen. Die Ausgleichsgerade wird aus allen Strahlwinkel-Strahlhöhe-Wertepaaren im Bereich $-Y_{\max}$ bis $+Y_{\max}$ bestimmt, wobei Y_{\max} die maximal mögliche Objekthöhe des kreisförmigen Objektfeldes angibt. Die Abweichung der Pupillenfunktion von der Ausgleichsgeraden soll und kann maximal ± 10 mrad, bevorzugt maximal ± 5 mrad betragen.

Durch die Farbkorrektur mit Hilfe der beiden Konkavspiegel und der spiegelnahen Linsen mit hoher negativer Brechkraft ist es möglich, daß alle Linsen aus einem Material sind.

Bei Wellenlängen ≤ 250 nm können unter anderem bevorzugt die Fluoridkristalle CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 , LiF, NaF, KF, neben speziellen Quarzgläsern und Mischkristallen zum Einsatz kommen.

In den Linsenzwischenräumen wird vorteilhafterweise ein Gas vorgesehen, das im Bereich der Arbeitswellenlänge nur eine geringe Absorption aufweist. Die Gasfüllung kann je nach Arbeitswellenlänge mit synthetischer Luft, N_2 oder Edelgasen erfolgen. Da in dem Raum zwischen den Konkavspiegeln große Lichtwege auftreten und Störungen durch Brechzahl- und Druckschwankungen einen großen Einfluss haben, wird der Raum zwischen den Konkavspiegeln vorzugsweise mit einem Gas gefüllt, dessen Brechzahl eine geringere Temperatur- und Druckabhängigkeit aufweist als Stickstoff. Ideal geeignet ist Helium.

Es bietet sich an, in einem Reduktionsobjektiv das beschriebene katadioptrische Objektiv mit einem refraktiven Objektiv zu koppeln. Das katadioptrische Objektiv nach den Ansprüchen 1 bis 22 stellt ein erstes Teilobjektiv dar, das die Objektebene in eine Zwischenbildebene abbildet. Die Zwischenbildebene wird mit einem refraktiven zweiten Objektiv verkleinert auf die Bildebene abgebildet. Der Abbildungsmaßstab des Reduktionsobjektives liegt dabei typisch im Bereich von $-0,1$ bis $-0,5$. Die Reihenfolge von katadioptrischem und refraktivem Teilobjektiv kann auch umgekehrt sein. In dem katadioptrischen Teilobjektiv werden durch die den Konkavspiegeln benachbarten Linsen mit stark negativen Brechkraften die chromatische Längsabweichung derart überkorrigiert und die Bildfeldkrümmung derart vorgehalten, daß sich in der Bildebene des Reduktionsobjektives ein in Bezug auf Farbe und Bildfeldkrümmung korrigiertes Bild ergibt. Die Linsen des refraktiven Teilobjektives korrigieren die Bildfehler sphärische Aberration, schiefe sphärische Aberration und Koma für ein Bildfeld größer 20 mm und eine bildseitige Apertur größer $\text{NA} = 0,7$.

Die Zwischenabbildung durch den katadioptrischen Objektivteil ist nur unzureichend korrigiert. Durch die starke Strahlaufweitung und die Linsen mit hoher negativer Brechkraft liegen im Zwischenbild Aberrationen wie beispielsweise eine große Innenkoma vor. Zur Korrektur dieser durch den katadioptrischen Objektivteil eingeführten Aberrationen und zur ausreichenden Korrektur des großen Bildfeldes und der hohen numerischen Apertur ist es vorteilhaft, wenn auch das refraktive Teilobjektiv mindestens eine asphärische Fläche aufweist.

Zwei zur Blendenebene symmetrisch angeordnete asphärische Linsenflächen erlauben neben einer Korrektur der sphärischen Aberration auch die Korrektur der winkelabhängigen Öffnungsfehler wie Koma und schiefe sphärische Aberration. Die beiden asphärischen Linsenflächen sind derart angeordnet, daß ein Hauptstrahl an beiden Flächen vom Betrag gesehen ähnlich große Strahlhöhen aufweist und der Unterschied in den Strahlhöhen maximal 30%, bevorzugt weniger als 20% beträgt.

Zur Korrektur der sphärischen Aberration und der Sinusbedingung ist es bei diesen und anderen Objektiven vorteilhaft, zwei benachbarte asphärische Flächen vorzusehen. Die beiden asphärischen Flächen können die beiden Seiten einer

Linse bilden, oder sie sind auf zwei Linsen vorgesehen und stehen sich getrennt durch einen Luftraum gegenüber. Besonders effektiv sind diese Doppelasphären in Blendennähe, so daß die Strahlhöhen des Hauptstrahls des äußersten Feldpunktes an den benachbarten asphärischen Flächen maximal 15%, bevorzugt maximal 10% des Durchmessers der Blende betragen.

Befindet sich das refraktive Teilobjektiv vor der Bildebene des Gesamtobjektives, so ist es günstig, in der der Zwischenbildebene benachbarten Feldlinsengruppe eine asphärische Fläche vorzusehen, um die Hauptstrahlwinkel derart zu beeinflussen, daß sich bildseitig ein telezentrischer Verlauf der Hauptstrahlen ergibt. Die Hauptstrahlwinkel bezüglich der Bildebene sollten innerhalb des ganzen Bildfeldes im Bereich von ± 5 mrad liegen. Die objektseitige Feldlinsengruppe des refraktiven Teilobjektives umfaßt all die Linsen, innerhalb derer der Randstrahl eines Objektpunktes auf der optischen Achse zwischen optischer Achse und Hauptstrahl des äußersten Feldpunktes verläuft.

Durch die chromatische Überkorrektur des katadioptrischen Teilobjektives ist es möglich, selbst bei einer Bandbreite der Lichtquelle von mehreren Pikometern (bis 10 pm) nur Linsen aus einem Material in dem refraktiven Teilobjektiv einzusetzen.

Das aus dem katadioptrischen und dem refraktiven Teilobjektiv gebildete Reduktionsobjektiv kann aufgrund der hohen numerischen Apertur von $NA > 0,70$ auch in einem Mikroskop eingesetzt werden. In dem Reduktionsobjektiv sind dann Objekt- und Bildebene zu vertauschen, bzw. das Objektiv ist in der umgekehrten Richtung zu betreiben. Eine weitere Erhöhung der Apertur kann bei einer Reduktion der Feldgröße erzielt werden.

Denkbar ist auch der Einsatz des Objektives für die Waferinspektion bei kleinen Feldern, sehr hohen Aperturen und Wellenlängen kleiner 250 nm. Dies kann dann schmal- oder breitbandig geschehen.

Üblicherweise wird diese Klasse von katadioptrischen Reduktionsobjektiven in der Mikrolithographie eingesetzt. Das Objektiv ist dann Bestandteil der Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage. Als Lichtquelle können im tiefen DUV/VUV-Wellenlängenbereich folgende Laser eingesetzt werden: ArF-Laser für 193 nm, F₂-Laser für 157 nm, Ar₂-Laser für 126 nm und NeF-Laser für 109 nm. Ein Beleuchtungssystem stellt die homogene Ausleuchtung der Strukturmaske sicher. Die Feldlinsengruppe des Beleuchtungssystems dient der Anpassung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems an die Eintrittspupille des Projektionsobjektives. Das Beleuchtungssystem enthält zusätzlich Mittel zur Steuerung der partiellen Kohärenz und zur Feldmaskierung der Strukturmaske.

Mit einer derartigen Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Bauteile mit Strukturgrößen auch unter 0,1 μ m herstellen.

Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

Fig. 1 zeigt den Linsenschnitt eines ersten Ausführungsbeispiels.

Fig. 2 zeigt die objektseitige Pupillenfunktion des ersten Ausführungsbeispiels.

Fig. 3 zeigt den Verlauf der tangentialen und sagittalen Schale für das erste Ausführungsbeispiel.

Fig. 4 zeigt für die Wellenlängen $\lambda = 157,63$ nm und $\lambda = 157,64$ nm den Verlauf der sphärischen Aberration für das erste Ausführungsbeispiel.

Fig. 5 zeigt den Linsenschnitt eines zweiten Ausführungsbeispiels.

Fig. 1 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel für das katadioptrische Reduktionsobjektiv mit Asphären. Die optischen Daten zu diesem Objektiv sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das katadioptrische Reduktionsobjektiv besteht aus einem katadioptrischen ersten Teilobjektiv L1 mit den Flächen 2 bis 48 und einem refraktiven zweiten Teilobjektiv L2 mit den Flächen 50 bis 84. Das katadioptrische erste Teilobjektiv L1 bildet die Objektebene OB mit einem Abbildungsmaßstab von $\beta_{L1} = -0,76$ leicht verkleinernd auf die Zwischenbildebene IMI ab. Die Zwischenbildebene IMI wird von dem refraktiven zweiten Teilobjektiv L2 deutlich verkleinernd mit einem Abbildungsmaßstab von $\beta_{L2} = -0,33$ auf die Bildebene IM abgebildet. Somit beträgt der gesamte Abbildungsmaßstab β von der Objektebene OB in die Bildebene IM $\beta = -0,25$. Das kreisförmige Objektfeld OB weist einen Durchmesser von 91,2 mm, das entsprechende Bildfeld IM einen Durchmesser von 22,8 mm auf. Wird das katadioptrische Objektiv in der Lithographie eingesetzt, so sind Objekt- und Bildfeld rechteckförmig. In das kreisförmige Bildfeld kann beispielsweise ein rechteckiges Feld mit den X-Y-Abmessungen 22 mm \times 6 mm eingeschrieben werden, wie es für Wafer-Scanner geeignet ist. Die bildseitige numerische Apertur beträgt in dem ersten Ausführungsbeispiel $NA = 0,8$. Eine derart hohe numerische Apertur in Verbindung mit dem großen Bildfeld ist erst jüngst überhaupt für Projektionsobjektive dargestellt worden.

Alle Linsen dieses katadioptrischen Reduktionsobjektives sind aus dem gleichen Material, in diesem Fall CaF₂. CaF₂ weist bei der Arbeitswellenlänge von $\lambda = 157,3$ nm eine Brechzahl von 1,55841 auf. Hat man die Möglichkeit, in dem Wellenlängenbereich kleiner 250 nm in Linsen mit negativer Brechkraft ein zweites Material mit höherer Dispersion einzusetzen, so kann die Farbkorrektur weiter verbessert werden. Denkbar ist zum Beispiel Natriumfluorid NaF als Gegenpart zu CaF₂.

Bei Wellenlängen $\lambda < 200$ nm wirkt Sauerstoff O₂ absorbierend, so daß eine Gasfüllung mit N₂ oder geeigneten Edelgasen vorzusehen ist. Im ersten Ausführungsbeispiel sind die Linsenzwischenräume mit N₂ gefüllt.

Das katadioptrische Teilobjektiv L1 besteht aus einer ersten Linsengruppe G11 mit den Flächen 2 bis 27, einem ersten Konkavspiegel M1 mit einer zentralen Aussparung B1, einer ersten Blendenebene AS1, einem zweiten Konkavspiegel M2 mit einer zentralen Aussparung B2 und einer zweiten Linsengruppe G12 mit den Flächen 33 bis 48. Diese optischen Komponenten werden von den Lichtstrahlen in der angegebenen Reihenfolge durchsetzt. In Fig. 1 sind für einen Objektpunkt auf der optischen Achse ($Y = 0,0$) und zwei weitere Objektpunkte am Feldrand bei $Y_{\min} = -45,6$ mm und $Y_{\max} = 45,6$ mm die Haupt- und Randstrahlen eingezeichnet. Die Hauptstrahlen sind gestrichelt gezeichnet, da sie im realen System durch die Aperturobskuration ausgeblendet werden und nur theoretischer Natur sind.

Die beiden einander zugewandten Konkavspiegel M1 und M2 erfüllen in dem katadioptrischen Teilobjektiv L1 zwei wesentliche Aufgaben: Zusammen mit den benachbarten Linsen negativer Brechkraft erzeugen sie die Überkorrektur des Farb längsfehlers und der Bildfeldkrümmung. Als Sammelspiegel besitzen sie eine große positive Brechkraft, führen dabei jedoch keine chromatischen Bildfehler ein. Zur chromatischen Überkorrektur in der Zwischenbildebene IMI weisen die erste Linsengruppe G11 und die zweite Linsengruppe G12 eine hohe negative Brechkraft auf, deren zerstreue Wirkung von den Sammelspiegeln wieder aufgehoben wird, so daß das erste Teilobjektiv L1 eine reelle Abbildung er-

zeugt. Gleichzeitig sind Linsen mit negativer Brechkraft bei niedrigen Randstrahlhöhen in Kombination mit Spiegeln positiver Brechkraft bei großen Randstrahlhöhen die idealen Korrektionsmittel zur Bildfeldebnung. Mit dem katadioptrischen Teilobjektiv L1 kann die Bildfeldkrümmung in der Zwischenbildebene IMI derart vorgehalten werden, daß sich nach der Abbildung mit dem refraktiven Teilobjektiv L2 ein ebenes Bildfeld in der Bildebene IM ergibt, ohne daß im Teilobjektiv L2 zusätzliche Korrektionsmittel zur Bildfeldebnung vorzusehen sind.

Die Spiegellöcher B1 des Konkavspiegels M1 und B2 des Konkavspiegels M2 führen zu einer Obskuration in der Pupillenausleuchtung. Bestimmte Aperturbereiche können bei dieser Klasse von Objektiven nicht übertragen werden. Im ersten Ausführungsbeispiel beträgt für einen Objektpunkt auf der optischen Achse der Sinus des Randstrahlwinkels $\sin(i_{\text{Max}}) = 0.2$ und der Sinus des minimal möglichen Aperturwinkels $\sin(i_{\text{Min}}) = 0.0369$. Die Aperturobskuration berechnet sich zu 18.5%.

Um die Strahlen abzuschatten, die auf die Aussparung B1 des ersten Konkavspiegels M1 treffen würden und einen Aperturwinkel kleiner i_{Min} aufweisen, ist in der Blendenebene AS1 vorteilhafterweise eine entsprechende Maskiervorrichtung vorgesehen. Diese Maskiervorrichtung wird so groß gewählt, daß für alle Objektpunkte die Aperturobskuration gleichgroß ist und zentriert zum Hauptstrahl liegt. Die für einen Punkt auf der optischen Achse minimal mögliche Aperturobskuration von 18.5% wird bei Berücksichtigung aller Objektpunkte auf 20% erhöht. Diese Maskiervorrichtung kann beispielsweise eine kreisrunde absorbierende Scheibe sein, die zentriert zur optischen Achse angebracht ist. Als Halterung kann ein Stab dienen, der entlang der optischen Achse verläuft und an den Linsenflächen 27 und 33 befestigt wird. In die beiden Linsenoberflächen kann zum Beispiel mit einem Diamanten eine Senke gedreht werden, in die der Haltestab eingelegt wird. Da sich der Bereich um die optische Achse in der Nähe der Blendenebene AS1 nicht im Abbildungsstrahlengang befindet, kann die Haltevorrichtung so ausgelegt werden, daß es zu keiner Beeinträchtigung der Abbildung kommt. Eine Halterung der Maskiervorrichtung mit Speichen oder dergleichen von der Linsen- oder Spiegelfassung aus würde zu Beugung und damit zur Reduzierung des Auflösungsvermögens führen.

Da die Aperturobskuration die Kontrastübertragungsfunktion dieser Klasse von Objektiven an sich beeinträchtigt, ist es von Vorteil, wenn diese Aperturobskuration so klein wie möglich gehalten wird. Alle optischen Komponenten des katadioptrischen Teilobjektives L1 sind deshalb so ausgelegt, daß die Aperturobskuration auf den minimal möglichen Wert beschränkt bleibt.

Um die Aperturobskuration klein zu halten, ist es erforderlich, daß die den Konkavspiegeln benachbarten Linsen eine große negative Brechkraft aufweisen. Im Ausführungsbeispiel sind das die Linsen mit den Flächennummern 24/25, 26/27 und 33/34, 35/36. Die Linsen enthalten in der ersten Linsengruppe G11 zur Objektebene OB konkave Konkavflächen 24 und 26, beziehungsweise in der zweiten Linsengruppe G12 zur Zwischenbildebene IMI konkave Konkavflächen 34 und 36 mit sehr großen Werten für das Öffnungsverhältnis von Linsenhöhe h_{max} zu Linsenradius R. So beträgt bei Fläche 24 $h_{\text{max}}/R_{24} = 0.72$ und bei Fläche 36 $h_{\text{max}}/R_{36} = 0.75$. Das Öffnungsverhältnis der Konkavflächen bei diesen spiegelnahen Negativlinsen ist also deutlich größer als 0.7.

Um die maximale Aufweitung der Aperturstrahlen nach der Linsengruppe G11 zu erzielen, wird die letzte Linse 26/27 der ersten Linsengruppe G11 als Bikonkavlinse ausgelegt, wobei die Inzidenzwinkel der Aperturstrahlen im optisch dünneren Medium, also mit Brechungsindex kleiner als 1,1, auf der dem Konkavspiegel M1 zugewandten Linsenseite 27 möglichst große Werte annehmen. Im vorliegenden Beispiel beträgt der Sinus des Auftreffwinkels bezüglich der Flächennormalen im optisch dünneren Medium für den Randstrahl an der Fläche 27 für einen Objektpunkt auf der optischen Achse $\sin(i_{27}^{\text{RD}}) = 0.779$. Entsprechend ist die erste Linse 33/34 der zweiten Linsengruppe G12 eine Bikonkavlinse, wobei die Linsenfläche 33 eine ähnlich hohe Winkelbelastung aufweist. So beträgt der Sinus des Inzidenzwinkels im optisch dünneren Medium bezüglich der Flächennormalen für den gleichen Randstrahl $\sin(i_{33}^{\text{RD}}) = 0.722$.

Mit der negativen Brechkraft der ersten Linsengruppe G11 ist es möglich, die Aperturstrahlen sehr stark aufzuweiten. So beträgt vor der ersten Linsengruppe G11 der Sinus des Winkels des Randstrahls eines Objektpunktes auf der optischen Achse 0.200, nach der ersten Linsengruppe G11 beträgt er 0.706. Die Aperturaufweitung für diesen Randstrahl beträgt also 3,532. Entsprechend verringert sich durch die negative Brechkraft der zweiten Linsengruppe G12 der Sinus des Winkels des gleichen Randstrahls bezüglich der optischen Achse von 0,676 vor der zweiten Linsengruppe G12 auf 0,304 nach der zweiten Linsengruppe G12, also um den Faktor 1/2,254.

Die Aperturaufweitung ist abhängig von der Größe des Aperturwinkels 11 vor der ersten Linsengruppe G11. Gerade bei einer sehr starken Strahlumlenkung mit nur wenigen sphärischen Linsenelementen würde es zu einer Zunahme der Aperturaufweitung mit zunehmendem Aperturwinkel i_1 kommen, die im folgenden als positive Verzeichnung der Aperturaufweitung bezeichnet wird. Diese Verzeichnung ist unerwünscht, da sie zu einer Zunahme der Spiegeldurchmesser führt, ohne daß dadurch die Aperturobskuration verringert werden könnte. Um mit rein sphärischen Linsenflächen die positive Verzeichnung der Aperturaufweitung zu reduzieren, müßte die negative Brechkraft der Linsen 24/26 und 26/27 auf weitere Linsen verteilt werden, um die Winkelbelastung der zerstreuen Flächen zu reduzieren. Zusätzliche Linsen würden jedoch zu einer Erhöhung der Baulänge und zu weiteren Transmissionsverlusten führen.

Die Verzeichnung der Aperturaufweitung kann ohne weitere Linsenelemente korrigiert werden, wenn in der Linsengruppe mit negativer Brechkraft (Fläche 24 bis 27) eine asphärische Linsenfläche 27 vorgesehen wird. Es ist günstig, wenn die letzte Linsenfläche 27 der ersten Linsengruppe G11 asphärisch ist, da dadurch die Verteilung der Strahlwinkel direkt vor dem ersten Konkavspiegel M1 beeinflusst werden kann. Ziel ist es, die positive Verzeichnung der Aperturaufweitung zu reduzieren und im Idealfall in eine negative Verzeichnung umzukehren. Mit einer Reduzierung der Aperturaufweitung für zunehmende Aperturwinkel i_1 können bei gleicher Aperturobskuration die Spiegeldurchmesser verringert werden. Im vorliegenden Beispiel beträgt für einen Randstrahl mit $i_1^{\text{R}} = 0.2$ die Aperturaufweitung $m_{\text{R}} = 3,532$. Für einen Paraxialstrahl mit $i_1^{\text{P}} = 0.002$ beträgt die Aperturaufweitung $m_{\text{P}} = 3,465$. Der Paraxialstrahl würde zwar aufgrund der Aperturobskuration im realen System keinen durchgehenden Strahlverlauf aufweisen, soll hier jedoch für ein fiktives System ohne Spiegelaussparungen betrachtet werden. Das Verhältnis der Aperturaufweitung m_{R} für den Randstrahl und m_{P} für den Paraxialstrahl beträgt $m_{\text{R}}/m_{\text{P}} = 1.019$. Die positive Verzeichnung der Aperturaufweitung liegt mit der asphärischen Linsenfläche 27 nur noch bei 2%. Die erste Fläche 33 der zweiten Linsengruppe G12 ist ebenfalls asphärisch, um die von der asphärischen Fläche 27 eingeführte Verzeichnung der Aperturaufweitung zu kompensieren. Da die den Kon-

kavspiegeln benachbarten Flächen 27 und 33 wie auch die Konkavspiegel M1 und M2 asphärisch sind, können die Aperturstrahlen zwischen erster und zweiter Linsengruppe G11 und G12 derart geführt werden, daß sich bei gegebener Aperturobskuration die Spiegeldurchmesser verringern lassen.

Um die Aperturobskuration weiter zu minimieren, sind die beiden Konkavspiegel M1 und M2 und die spiegelnahen Linsen 26/27 und 33/34 nahezu symmetrisch zur Blendenebene AS1 angeordnet. Der Abstand der Konkavspiegel M1 und M2, wie auch der Linsenflächen 27 und 33 zur Blendenebene AS1 beträgt jeweils 189,73 mm. Die beiden Spiegel sind konkav zur Blendenebene angeordnet und weisen ähnliche Durchbiegungen auf. Die Negativlinsen 26/27 und 33/34 sind Bikonkavlinsen, wobei die schwächer gekrümmte Fläche jeweils der Blendenebene AS1 zugewandt ist. Durch diesen Aufbau ergibt sich zwischen den Flächen 27 und 33 ein zur Blendenebene AS1 weitgehend symmetrischer Strahlverlauf. So weist ein Randstrahl von einem Objektpunkt auf der optischen Achse an der letzten Fläche 27 der ersten Linsengruppe G11 und an der ersten Fläche 33 der zweiten Linsengruppe G12 eine nahezu gleiche Strahlhöhe auf. An Fläche 27 beträgt die Strahlhöhe $h_{G11} = 40,66$ mm und an Fläche 33 beträgt die Strahlhöhe $h_{G12} = 40,56$ mm. Durch diesen zur Blendenebene AS1 symmetrischen Aufbau ist der Anteil der Spiegellöcher B1 und B2 an der Aperturobskuration nahezu gleich groß.

Im ersten Ausführungsbeispiel befinden sich zumindest die Randbereiche der Linse 26/27 und der Linse 33/34 im Raum zwischen den Konkavspiegeln M1 und M2. Dadurch erreicht man, daß einerseits der Abstand von Linse 26/27 zum Konkavspiegel M1 und der Abstand der Linse 33/34 zum Konkavspiegel M2 so gering wie möglich ist. Andererseits darf durch die letzte Linse 26/27 der ersten Linsengruppe G11 und die erste Linse 33/34 der zweiten Linsengruppe der Strahlengang zwischen den Konkavspiegeln M1 und M2 nur minimal vignettiert werden.

Es ist günstig, wenn das katadioptrische Reduktionsobjektiv eine näherungsweise homozentrische Eintrittspupille aufweist. Das heißt, die bis zur optischen Achse verlängerten Hauptstrahlen sollen sich in einem Punkt auf der optischen Achse schneiden. In Fig. 2 ist die reale Pupillenfunktion für 37 Hauptstrahlhöhen für das Ausführungsbeispiel der Tabelle 1 angegeben. Sie verläuft zwischen $\pm 10,1$ mrad und weist neben einem linearen Anteil auch höhere Ordnungen auf. Die Hauptstrahlen verlaufen konvergent zur optischen Achse, so daß die Eintrittspupille virtuell ist. Als durchgezogene Linie ist eine Ausgleichsgerade eingezeichnet, die dadurch bestimmt wurde, daß die positive und negative Abweichung der objektseitigen Pupillenfunktion von der Ausgleichsgeraden über das gesamte Objektfeld von $-45,6$ mm bis $45,6$ mm minimal ist. Alle Werte der objektseitigen Pupillenfunktion liegen in Fig. 2 in einem Bereich von $\pm 4,5$ mrad um die Ausgleichsgerade. Über den linearen Anteil der objektseitigen Pupillenfunktion kann durch Defokussieren des Objektes bei gleichzeitiger Manipulation eines weiteren Lufraumes eine Maßstabsänderung vorgenommen werden.

Um die objektseitige Pupillenfunktion beeinflussen zu können, weist die objektseitige Feldlinsengruppe FL1 mit den Flächen 2 bis 17 eine asphärische Fläche 12 auf. Eine Pupillenfunktion mit einem dominanten linearen Anteil bei einem Objektdurchmesser von 91,2 mm und einer objektseitigen numerischen Apertur von $NAO = 0,2$ bereitzustellen, würde ohne die asphärische Fläche 12 zusätzliche Linsen erfordern.

Zur Steuerung der Pupillenfunktion ist die Feldlinsengruppe FL1 aus einer ersten Untergruppe G111 mit den Flächen 2 bis 5 und einer zweiten Untergruppe G112 mit den Flächen 6 bis 19 aufgebaut. Dabei weist die erste Untergruppe G111 eine negative, die zweite Untergruppe G112 eine positive Brechkraft auf. Die asphärische Fläche 12 in der zweiten Untergruppe G112 mit positiver Brechkraft anzuordnen, hat den Vorteil, daß sich die Beiträge höherer Ordnung der asphärischen Fläche aufgrund des Abstandes zur Objektebene nicht direkt auf die Pupillenfunktion auswirken. Zudem wurde durch die negative Brechkraft der ersten Untergruppe G111 die Aufspaltung der Strahlbüschel vergrößert. Die Linsen mit den Flächen 20 bis 27 bilden eine dritte Untergruppe G113 mit negativer Brechkraft, die bereits der Strahlaufweitung dient.

Die der Zwischenbildebene IMI benachbarten Feldlinsengruppen FL12 mit den Flächen 41 bis 48 und FL21 mit den Flächen 50 bis 55 weisen ebenfalls asphärische Flächen 48 und 53 auf, die in diesem Fall die bildseitige Pupillenfunktion und die Verzeichnung in der Bildebene IM beeinflussen. In der Bildebene IM soll die Verteilung der Hauptstrahlwinkel möglichst telezentrisch sein. So verläuft die bildseitige Pupillenfunktion für das Ausführungsbeispiel der Tabelle 1 zwischen $\pm 3,6$ mrad. Für den Einsatz in der Mikrolithographie ist es ausreichend, wenn die bildseitige Pupillenfunktion Werte zwischen ± 10 mrad aufweist.

Durch die Überkorrektur der Bildfeldkrümmung mit dem katadioptrischen Teilobjektiv L1 kann auf einen taillierten Strahlengang zur Petzval-Korrektur innerhalb des dioptrischen Teilobjektives L2 verzichtet werden. Dadurch bleiben die Linsendurchmesser beschränkt. Der maximale Linsendurchmesser im Teilobjektiv L2 beträgt 116,5 mm an Fläche 62. Auch im ersten Teilobjektiv L1 sind die Linsendurchmesser gering, um die Aperturobskuration zu reduzieren. Die größte Linse im katadioptrischen Teilobjektiv L1 befindet sich mit 130,4 mm Durchmesser in der Linsengruppe G112. Über die spiegelnahen asphärischen Flächen 27 und 33 konnten bei einer Aperturobskuration von 20% die Spiegeldurchmesser kleiner 700 mm gehalten werden. So weist Konkavspiegel M1 einen Durchmesser von 691,5 mm und Konkavspiegel M2 einen Durchmesser von 663,0 mm auf.

Die Querabweichungen der Aperturstrahlen sind bei der Zwischenabbildung des katadioptrischen Teilobjektives L1 nur unzureichend korrigiert. Die große Innenkoma ist in Fig. 1 deutlich sichtbar. Die eingezeichneten Randstrahlen für den Objektpunkt bei $Y_{\min} = -45,6$ mm verlaufen in der Zwischenbildebene IMI zwischen optischer Achse und eingezeichnetem Hauptstrahl. Der Abstand der Randstrahlen zum Hauptstrahl beträgt in der Zwischenbildebene IMI 7 mm. Die Korrektur der durch das katadioptrische Teilobjektiv L1 eingeführten Bildfehler erfolgt im refraktiven Teilobjektiv L2. Besonders effektiv für die Korrektur von sphärischer Aberration, schiefer sphärischer Aberration und Koma sind die asphärischen Linsenflächen 66 und 78. Ihre Position ist so gewählt, daß die Hauptstrahlhöhen betragsmäßig nahezu gleich groß sind. So weist ein von $Y_{\min} = -45,6$ mm ausgehender Hauptstrahl an der Fläche 66 eine Strahlhöhe von 8,65 mm und an der Fläche 78 eine Strahlhöhe von $-9,59$ mm auf. Günstig zur Korrektur sind auch die beiden Menisken 70/71 und 73/74, die konvex zur Blendenebene AS2 angeordnet sind.

Mit der Kombination von katadioptrischem Teilobjektiv L1 und refraktivem Teilobjektiv L2 und mit dem gezielten Einsatz von asphärischen Flächen kann bei kleiner Aperturobskuration das Bildfeld hervorragend korrigiert werden. Als Maß für die Qualität des Objektivs kann mit Hilfe einer polychromatischen Simulation die Wellenfront innerhalb des

Bildfeldes von 22,8 mm Durchmesser und bei der bildseitigen numerischen Apertur von $NA = 0,8$ betrachtet werden. Die RMS (Root Mean Square)-Werte der Wellenfrontabweichung für eine Lichtquelle bei 157,63 nm mit einer Bandbreite von 1,2 pm sind innerhalb des gesamten Bildfeldes kleiner als 8 mλ. Diese geringen Wellenfrontabweichungen lassen sich unter anderem mit der hervorragenden Korrektur von Bildschale und sphärischer Aberration erklären. In Fig. 3 ist der Verlauf der sagittalen und tangentialen Schale innerhalb des Bildfeldes aufgetragen. Die sagittale Bildschale S ist durchgezogen, die tangentiale Bildschale T ist strichpunktiert gezeichnet. Die Ablage der Bildschalen bezüglich der Gaußschen Bildebene ist kleiner 1 μm und beträgt für die tangentiale Bildschale maximal 200 nm. Den Verlauf der sphärischen Aberration ΔS für die Wellenlängen $\lambda_1 = 157,63$ nm (ΔS₁ durchgezogene Linie) und $\lambda_2 = 157,64$ nm (ΔS₂ gestrichelte Linie) zeigt Fig. 4. Die sphärische Aberration ΔS der Aperturstrahlen ist dabei über dem Quadrat der Strahlhöhen h_{AS} in der Systemblende ΔS₂ aufgetragen. Über die volle Öffnung des Objektivs sind die Werte für die sphärische Aberration ΔS kleiner 1 μm, im ersten Ausführungsbeispiel kleiner 260 nm. Der Farblängsfehler für die beiden Wellenlängen im Abstand von 10 pm ist kleiner 0,1 nm. Der Gaußfehler für die beiden Wellenlängen beträgt maximal 110 nm.

Um eine feldunabhängige Aperturobskuration zu erreichen, ist es vorteilhaft, auch im refraktiven Teilobjektiv L2 eine Maskiervorrichtung vorzusehen. Da die Blendenfläche AS₂ im refraktiven Teilobjektiv L2 eine positive Krümmung aufweist und die Hauptstrahlen die optische Achse zwischen Fläche 69 und 70 schneiden, sollte die Maskiervorrichtung zwischen Fläche 69 und Fläche 70 angebracht werden. Ihre Größe ist so zu wählen, daß die von den Spiegellöchern verursachte Aperturobskuration nur so weit erhöht wird, daß sich für jeden Feldpunkt eine gleich große und zum Hauptstrahl zentrierte Aperturobskuration ergibt. Als Halterung der Maskiervorrichtung kann ein Stab dienen, der entlang der optischen Achse verläuft und an den Linsenflächen 69 und 70 befestigt wird. Möglich ist auch, die Maskierung direkt auf einer Linsenfläche aufzubringen, die in der Nähe der Schnittpunkte der Hauptstrahlen mit der optischen Achse liegt, wie beispielsweise Fläche 70.

Fig. 5 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes katadioptrisches Reduktionsobjektiv. Die optischen Daten des Objektivs sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Abbildungsmaßstab, Objektgröße und numerische Apertur weisen die gleichen Werte wie im ersten Ausführungsbeispiel auf. Auch die Aperturobskuration und die äußeren Abmessungen sind vergleichbar. Die Unterschiede zum ersten Ausführungsbeispiel liegen in der Gasfüllung, den spiegelnahen Linsen mit negativer Brechkraft und dem Einsatz einer Doppelasphäre im refraktiven Teilobjektiv.

Die Linsen- und Spiegelzwischenräume werden im zweiten Ausführungsbeispiel mit Helium gespült. Die Gasfüllung mit Helium hat den Vorteil, daß die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Brechzahl bei Helium im Vergleich zu Stickstoff um den Faktor 10 geringer ist. So beträgt der Temperaturkoeffizient der Brechzahl dn/dT bei $\lambda = 157,6$ nm, $T = 0^\circ\text{C}$ und $p = 1013$ mbar für Stickstoff $-1,2 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ und für Helium $-0,14 \cdot 10^{-6}/\text{K}$, der Druckkoeffizient der Brechzahl dn/dp für Stickstoff $-0,34 \cdot 10^{-6}/\text{mbar}$ und für Helium $-0,036 \cdot 10^{-6}/\text{mbar}$. In dem großen Volumen zwischen den Konkavspiegeln M1' und M2' werden Temperaturgradienten, die während der Bestrahlung auftreten, zu Konvektion führen. Durch Konvektion kommt es bei Materialien mit temperaturabhängigen Brechzahlen zu einer zeitabhängigen Deformation der Wellenfronten, die nicht korrigierbar ist. Es ist deshalb vorteilhaft, den Raum zwischen den Spiegeln mit einem Gas mit minimaler Temperaturabhängigkeit der Brechzahl zu füllen.

Um Transmissionsverluste durch Reflexion an Linsenflächen zu vermindern, ist die Linsenzahl möglichst gering zu halten. So können die beiden Linsen negativer Brechkraft vor und nach dem Konkavspiegeln (24/25, 26/27, 33/34 und 35/36) des ersten Ausführungsbeispiels zu je einer Negativlinse (126/127 und 133/134) im zweiten Ausführungsbeispiel zusammengefaßt werden. Um dabei auf eine Strahlaufweitung für den Randstrahl von 3,567 und eine Aperturobskuration für einen Objektpunkt auf der optischen Achse von 18% zu kommen, muß die negative Brechkraft der Linsen 126/127 und 133/134 erhöht werden. Dies ist zum einen mit einem größeren Öffnungsverhältnis von Linsenhöhe h_{Max} Linsenradius R möglich. So beträgt bei Fläche 126 der Quotient $h_{126}^{\text{max}}/R_{126} = 0,814$ und bei Fläche 134 beträgt er $h_{134}^{\text{max}}/R_{134} = 0,800$. Zum anderen wurde die Winkelbelastung der den Spiegeln zugewandten Linsenflächen 127 und 133 erhöht. Im zweiten Ausführungsbeispiel beträgt der Sinus des Auftreffwinkels bezüglich der Flächennormalen im optisch dünneren Medium für den Randstrahl für einen Objektpunkt auf der optischen Achse an der Fläche 127 $\sin(i_{127}^{\text{RD}}) = 0,802$ und an der Fläche 133 beträgt er $\sin(i_{133}^{\text{RD}}) = 0,748$.

Um für das zweite Ausführungsbeispiel eine ähnlich gute Wellenfrontkorrektur innerhalb des Bildfeldes wie im ersten Ausführungsbeispiel zu erzielen, ist es vorteilhaft, im refraktiven Teilobjektiv L2' eine Doppelasphäre auf den Flächen 172 und 173 vorzusehen. Mit den benachbarten asphärischen Flächen in der Nähe der Systemblende AS₂ können die sphärische Aberration und die Sinus-Bedingung zugleich hervorragend korrigiert werden. Der Einsatz von Doppelasphären als Korrektionsmittel bietet sich auch in rein refraktiven oder in katadioptrischen Objektiven mit nicht zentrierter Anordnung an. Die beiden asphärischen Flächen könnten auch Vorder- und Rückseite einer einzelnen Linse bilden. Aus fertigungstechnischen Gründen ist es jedoch günstig, zwei Linsen mit je einer asphärischen Fläche so anzuordnen, daß die asphärischen Flächen benachbart sind.

Mit der Doppelasphäre (172, 173) und mit den vor und hinter der Systemblende AS₂ angeordneten asphärischen Flächen 164 und 176 stehen ausreichend Korrektionsmittel zur Verfügung, um mit mäßigem Materialeinsatz die Wellenfrontabweichung innerhalb eines Bildfeldes von 22,8 mm Durchmesser und bei einer bildseitigen numerischen Apertur von $NA = 0,8$ auf kleiner 8 mλ zu korrigieren. Die polychromatische Simulation wurde mit einer Lichtquelle bei 157,6 nm und einer Bandbreite von 1,2 pm durchgeführt.

Die Beispiele zeigen die Kombination eines koaxialen katadioptrischen Objektivs mit einem dioptrischen Teilobjektiv. Andere Kombinationen, wie beispielsweise mit zwei dioptrischen Teilobjektiven vor und nach dem katadioptrischen Teilobjektiv, sind im Rahmen der Erfindung genauso möglich.

Die schematische Darstellung in Fig. 6 zeigt ein Mikroskop mit einem erfindungsgemäßen Mikroskopobjektiv MO. Nach einem Objekt OB folgt ein dioptrisches Teilobjektiv L61, mit dessen Hilfe das Objekt OB vergrößert in die Zwischenbildebene IMI abgebildet wird. Ein katadioptrisches Objektiv 62 führt eine nahezu 1 : 1-Abbildung der Zwischenbildebene IMI auf einen Bilddetektor CCD durch. Das Design des Mikroskopobjektivs MO entspricht im Prinzip den Ausführungsbeispielen 1 oder 2, nur daß die optischen Komponenten in umgekehrter Reihenfolge angeordnet sind. Um die Vergrößerung und die objektseitige numerische Apertur erhöhen zu können, kann die Größe des Objektfeldes redu-

ziert werden. Ein Okular zur visuellen Beobachtung kann anstelle des Bilddetektors CCD eingesetzt werden. Mit dem Beleuchtungssystem III wird das Objekt OB in Transmission beleuchtet.

Eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile ist schematisch in Fig. 7 dargestellt. Sie besteht aus einer Lichtquelle 701, einem Beleuchtungssystem 702, einer Strukturmaske 703, einem katadioptrischen Reduktionsobjektiv 704 und einem zu belichtenden Objekt 705. Als Lichtquelle 701 kann beispielsweise ein Excimer-Laser für Wellenlängen kleiner 250 nm eingesetzt werden. Im Beleuchtungssystem 702 sind optische Komponenten zur Strahlformung, wie beispielsweise Zylinderlinsen, zur Strahlhomogenisierung, wie beispielsweise ein Wabenkondensor, und zur korrekten Ausleuchtung von Strukturmaske und der Eintrittspupille des Projektionsobjektives 704, wie beispielsweise eine Feldlinsengruppe, vorgesehen. Der Maskenhalter 720 dient der Positionierung und dem Wechsel der Strukturmaske 703. Das katadioptrische Reduktionsobjektiv weist in diesem Fall zwei Zwischenbilder IMI1 und IMI2 auf. Dabei sind die Teilobjektive 710 und 712 dioptrisch und das Teilobjektiv 711 katadioptrisch ausgebildet. Das katadioptrische Teilobjektiv 711 führt eine nahezu 1 : 1-Abbildung aus und entspricht dem Design nach einem katadioptrischen Teilobjektiv aus dem ersten oder zweiten Ausführungsbeispiel. Es ist günstig, wenn der Abbildungsmaßstab des Reduktionsobjektives 704 von den beiden dioptrischen Teilobjektiven 710 und 712 zu gleichen Teilen bereitgestellt wird. Selbstverständlich kann als Reduktionsobjektiv auch ein Objektiv entsprechend dem ersten oder zweiten Ausführungsbeispiel verwendet werden. Das zu belichtende Objekt 705 kann beispielsweise ein mit Photolack beschichteter Silizium-Wafer sein. Zu dessen Positionierung und Austausch ist die Haltevorrichtung 730 bestimmt.

DE 100 02 626 A 1

Tabelle 1

	Fläche	Radius	Asphäre	Spiegel	Dicke	Material	Durchm.
5	OB	UNENDL			26.122	N ₂	100.0
	2	-226.258			4.000	CAF2	99.7
	3	1694.910			7.361	N2	104.1
	4	-210.020			4.023	CAF2	104.1
10	5	-4263.571			0.750	N2	110.8
	6	353.550			30.488	CAF2	117.3
	7	-137.865			0.750	N2	122.7
	8	116.889			15.735	CAF2	130.4
	9	177.655			5.923	N2	127.8
15	10	118.343			32.491	CAF2	126.6
	11	-373.347			2.660	N2	122.1
	12	-231.515	A		7.862	CAF2	122.1
	13	88.994			0.864	N2	107.7
20	14	77.637			8.155	CAF2	108.4
	15	81.208			20.608	N2	105.4
	16	221.890			9.012	CAF2	105.5
	17	163.578			2.429	N2	103.7
25	18	110.213			27.605	CAF2	104.6
	19	-1324.253			9.444	N2	100.5
	20	97.719			4.000	CAF2	89.4
	21	64.603			14.158	N2	83.4
30	22	684.267	A		5.079	CAF2	83.4
	23	216.155			24.074	N2	82.3
	24	-57.188			2.000	CAF2	82.3
	25	-92.747			5.064	N2	87.8
35	26	-72.557			2.000	CAF2	88.3
	27	344.860	A		189.734	N2	105.0
	M1	-813.737	A	S	-189.734	N2	691.5
	AS1	UNENDL			-189.734	N2	677.8
40	M2	910.975	A	S	189.734	N2	663.0
	33	-416.373	A		2.000	CAF2	106.4
	34	65.887			4.948	N2	87.8
	35	80.253			2.000	CAF2	87.3
45	36	54.610			31.217	N2	81.7
	37	-84.333			7.747	CAF2	81.6
	38	-75.708			0.750	N2	83.7
	39	-1017.773			27.565	CAF2	81.7
50	40	-155.591			5.282	N2	79.9
	41	-81.310			8.228	CAF2	79.9
	42	-68.211			1.949	N2	80.7
	43	-78.791			6.095	CAF2	77.1
	44	-108.111			2.600	N2	77.2
55	45	-81.487			21.352	CAF2	77.2
	46	-143.068			0.938	N2	80.4
	47	199.620			40.095	CAF2	79.0
	48	-145.642	A		20.000	N2	71.9
60	IMI	UNENDL			44.528	N2	67.0
	50	-75.128			4.117	CAF2	69.0
	51	-90.888			0.971	N2	72.4
65	52	-632.737			22.418	CAF2	76.6

53	408.536	A		0.900	N2	87.2
54	147.577			23.537	CAF2	91.9
55	-284.699			1.148	N2	94.9
56	544.076			28.648	CAF2	96.3
57	-917.060			10.169	N2	97.7
58	1123.355			15.459	CAF2	98.1
59	2847.866			22.266	N2	98.0
60	-84.178			4.000	CAF2	98.0
61	-351.550			0.750	N2	105.7
62	131.866			26.379	CAF2	116.5
63	-235.538			2.325	N2	116.4
64	222.992			31.521	CAF2	111.2
65	38305.126			9.715	N2	101.7
66	-2322.734	A		22.553	CAF2	96.4
67	1104.047			13.909	N2	88.6
68	-81.868			7.918	CAF2	88.6
69	-177.471			8.961	N2	91.5
70	-86.806			6.077	CAF2	91.5
71	-96.333			1.537	N2	94.4
AS2	UNENDL			0.750	N2	95.3
73	130.184			4.810	CAF2	103.5
74	97.753			2.761	N2	104.4
75	116.560			23.022	CAF2	104.4
76	-270.739			0.750	N2	105.5
77	194.680			18.881	CAF2	107.1
78	-210.640	A		0.750	N2	106.4
79	55.466			43.620	CAF2	92.6
80	50.189			2.182	N2	59.6
81	37.769			13.715	CAF2	55.3
82	77.000			1.188	N2	47.9
83	60.105			8.895	CAF2	44.7
84	185.707			5.644	N2	36.9
IM	UNENDL				N2	22.8

Asphärenformel

$$z = \frac{\frac{1}{R} h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - EX) \left(\frac{1}{R} \right)^2 h^2}} + \sum_{k=1} c_k h^{2k+2}$$

z: Pfeilhöhe; h: Höhe; R: Radius; EX: Exzentrizität; C_k: Asphärenkonstanten

ASPHAERE AN FLAECHE 12

RADIUS = -231.51455 MAXIMALHÖEHE = 61.10

ASPHAEREN-PARAMETER

EX = -2.3650089000

C 1 = .4794899400E-07

C 2 = .6604175100E-11

C 3 = -.7562978300E-15

C 4 = .6805192600E-19

C 5 = -.2666129900E-23

DE 100 02 626 A 1

ASPHAERE AN FLAECHE 22

RADIUS = 684.26729 MAXIMALHOEHE = 41.80
ASPHAEREN-PARAMETER
5 EX = .0000000000
C 1 = .1509596800E-06
C 2 = -.5120549400E-10
C 3 = -.5610431800E-14
C 4 = -.1117020200E-16
10 C 5 = .2518000300E-20
C 6 = -.1694764600E-23

ASPHAERE AN FLAECHE 27

15 RADIUS = 344.85984 MAXIMALHOEHE = 52.50
ASPHAEREN-PARAMETER
EX = 7.0085930000
C 1 = -.5923208000E-07
C 2 = .1890459800E-10
20 C 3 = -.4378968800E-15
C 4 = -.5239005100E-18
C 5 = .1912278200E-21

ASPHAERE AN FLAECHE 29

25 RADIUS = -813.73677 MAXIMALHOEHE = 345.80
ASPHAEREN-PARAMETER
EX = 1.0459455000
C 1 = -.4485550100E-10
C 2 = -.1176505800E-15
30 C 3 = -.1049527100E-20
C 4 = -.8619328500E-26
C 5 = -.2274167800E-31
C 6 = .3345014000E-37
C 7 = -.3286498200E-43

ASPHAERE AN FLAECHE 31

35 RADIUS = 910.97468 MAXIMALHOEHE = 331.50
ASPHAEREN-PARAMETER
EX = .9036275200
C 1 = .6193779100E-10
40 C 2 = -.1344616200E-15
C 3 = -.1509012800E-20
C 4 = -.7421992700E-26
C 5 = -.4535969900E-31
45 C 6 = .1986463200E-36
C 7 = -.1449901900E-41

ASPHAERE AN FLAECHE 33

50 RADIUS = -416.37282 MAXIMALHOEHE = 53.30
ASPHAEREN-PARAMETER
EX = 13.3142580000
C 1 = .6027181300E-07
C 2 = .2450300200E-10
55 C 3 = -.4142498400E-14
C 4 = .3917454300E-18
C 5 = -.1088457000E-25

ASPHAERE AN FLAECHE 48

60 RADIUS = -145.64247 MAXIMALHOEHE = 36.00
ASPHAEREN-PARAMETER
EX = -.4376678300
C 1 = -.2590488300E-07
65 C 2 = .4696937200E-12
C 3 = .7666469100E-16
C 4 = .8507764300E-21
C 5 = -.1186245400E-25

DE 100 02 626 A 1

ASPHAERE AN FLAECHE 53

RADIUS = 408.53641 MAXIMALHOEHE = 43.60

ASPHAEREN-PARAMETER

EX = -14.2359470000

C 1 = .9773912300E-07

C 2 = -.6627558800E-11

C 3 = -.2537861300E-15

C 4 = -.1281961700E-18

C 5 = -.1182417800E-25

5

10

ASPHAERE AN FLAECHE 66

RADIUS = -2322.73355 MAXIMALHOEHE = 48.20

ASPHAEREN-PARAMETER

EX = -504.9485600000

C 1 = -.2616677600E-07

C 2 = -.3063442300E-10

C 3 = .3964984700E-14

C 4 = -.1714421100E-17

C 5 = -.1187390100E-25

15

20

ASPHAERE AN FLAECHE 78

RADIUS = -210.64008 MAXIMALHOEHE = 53.20

ASPHAEREN-PARAMETER

EX = 6.3257878000

C 1 = .4095943500E-07

C 2 = .1712273600E-12

C 3 = .9639448600E-15

C 4 = -.2847604400E-18

C 5 = .7274168800E-23

25

30

35

40

45

50

55

60

65

DE 100 02 626 A 1

Tabelle 2

	Fläche	Radius	Asphäre	Spiegel	Dicke	Material	Durchm.
5	OB'	UNENDL			26.122	He	50.0
	102	-204.364			4.000	CaF2	49.7
	103	-13179.432			7.350	He	51.9
	104	-184.672			4.011	CaF2	51.9
10	105	-1226.241			0.753	He	55.3
	106	259.607			26.956	CaF2	60.1
	107	-147.776			0.750	He	61.4
	108	125.704			11.380	CaF2	63.6
15	109	178.234			0.750	He	62.7
	110	111.880			29.403	CaF2	62.4
	111	-380.095			3.030	He	60.9
	112	-235.417	A		17.184	CaF2	60.9
20	113	82.808			0.750	He	51.7
	114	67.123			8.979	CaF2	52.5
	115	69.627			17.234	He	50.6
	116	281.120			6.567	CaF2	50.6
25	117	272.393			0.758	He	50.2
	118	115.088			36.934	CaF2	50.2
	119	389.484			0.750	He	45.5
	120	88.823			4.097	CaF2	43.6
30	121	73.172			15.989	He	41.7
	122	-1528.771			10.066	CaF2	41.4
	123	217.517			13.370	He	40.3
	124	-89.601			7.977	CaF2	40.3
	125	-76.531			9.154	He	41.2
35	126	-50.697			4.001	CaF2	41.2
	127	259.195	A		189.734	He	52.7
	M1'	-814.100	A	S	-189.734	He	349.3
	AS1'	UNENDL			-189.734	He	342.6
40	M2'	911.247	A	S	189.734	He	335.0
	133	-276.266	A		4.000	CaF2	54.0
	134	52.152			32.685	He	41.7
	135	-80.264			6.728	CaF2	41.7
45	136	-77.215			0.850	He	42.8
	137	-1419.828			32.679	CaF2	41.9
	138	-147.648			5.801	He	41.0
	139	-78.453			7.489	CaF2	41.0
50	140	-70.298			0.750	He	41.5
	141	-84.334			6.166	CaF2	40.2
	142	-98.563			2.147	He	40.3
	143	-80.891			21.397	CaF2	40.3
55	144	-151.520			0.750	He	42.0
	145	242.014			45.863	CaF2	41.3
	146	-145.419	A		22.791	He	37.5
	IMI'	UNENDL			43.060	He	33.2
60	148	-77.276			4.000	CaF2	34.7
	149	-95.689			0.751	He	36.4
	150	-894.688			22.703	CaF2	38.6
	151	427.406	A		0.750	He	43.9
65	152	143.694			24.676	CaF2	46.4

DE 100 02 626 A 1

153	-346.670			2.353	He	47.9
154	347.126			29.393	CaF2	48.8
155	-10246.191			11.340	He	49.1
156	479.165			15.800	CaF2	49.3
157	634.264			23.350	He	48.8
158	-81.257			4.000	CaF2	48.8
159	-299.826			0.750	He	52.8
160	128.827			26.561	CaF2	58.6
161	-250.110			0.783	He	58.5
162	213.461			33.162	CaF2	56.1
163	-4384.454			9.042	He	51.0
164	-1171.671	A		24.405	CaF2	48.4
165	1409.721			14.203	He	44.3
166	-79.418			7.954	CaF2	44.3
167	-174.125			8.406	He	45.9
168	-85.986			6.344	CaF2	45.9
169	-94.556			0.750	He	47.5
AS2'	UNENDL			0.750	He	48.0
171	128.150			4.001	CaF2	52.4
172	99.397	A		2.565	He	52.8
173	116.720	A		23.743	CaF2	52.8
174	-265.459			0.750	He	53.3
175	220.793			18.648	CaF2	53.8
176	-192.915	A		0.751	He	53.4
177	55.415			43.719	CaF2	46.3
178	48.232			2.666	He	29.6
179	37.843			13.583	CaF2	27.5
180	77.482			0.896	He	23.8
181	61.588			9.014	CaF2	22.5
182	233.027			5.544	He	18.7
IM'	UNENDL				He	11.6

Asphärenformel:

$$z = \frac{\frac{1}{R} h^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - EX) \left(\frac{1}{R} \right)^2 h^2}} + \sum_{k=1} c_k h^{2k+2}$$

z: Pfeilhöhe; h: Höhe; R: Radius; EX: Exzentrizität; C_k: Asphärenkonstanten

ASPHAERE AN FLAECHE 112

RADIUS = -235.41701
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = -3.5655174000
 C 1 = .1594103700E-07
 C 2 = .9691002400E-11
 C 3 = -.2966744600E-15
 C 4 = -.7513476000E-20
 C 5 = .2320168900E-23

ASPHAERE AN FLAECHE 127

RADIUS = 259.19472
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = 10.5339150000
 C 1 = -.7249663100E-07

C 2 = .2029178100E-10
 C 3 = .1880266700E-14
 C 4 = -.8749673900E-18
 C 5 = .1693100300E-21

5

ASPHAERE AN FLAECHE 129

RADIUS = -814.09969
 ASPHAEREN-PARAMETER

10 EX = 1.0403493000
 C 1 = -.4617273800E-10
 C 2 = -.1656492900E-15
 C 3 = -.7032735900E-21
 C 4 = -.8196216800E-26
 15 C 5 = -.4593606600E-31
 C 6 = .2130418500E-36
 C 7 = -.5288525800E-42

ASPHAERE AN FLAECHE 131

20 RADIUS = 911.24655
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = .9046279400
 C 1 = .6158933500E-10
 25 C 2 = -.9961809700E-16
 C 3 = -.1507405000E-20
 C 4 = -.5950193100E-26
 C 5 = -.8479544000E-31
 C 6 = .5389473000E-36
 30 C 7 = -.2457441000E-41

ASPHAERE AN FLAECHE 133

RADIUS = -276.26621
 35 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = 17.9914210000
 C 1 = .7160629600E-07
 C 2 = .2347805100E-10
 C 3 = -.4079465600E-14
 40 C 4 = .3665147100E-18
 C 5 = -.1164774600E-25

ASPHAERE AN FLAECHE 146

45 RADIUS = -145.41928
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = -.6001124400
 C 1 = -.3516934200E-07
 C 2 = -.6766352800E-13
 50 C 3 = .3886201400E-16
 C 4 = .3232846800E-19
 C 5 = -.1183342300E-25

ASPHAERE AN FLAECHE 151

55 RADIUS = 427.40595
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = -5.9773913000
 C 1 = .7201853700E-07
 60 C 2 = -.2977626800E-11
 C 3 = -.4822696100E-15
 C 4 = -.3850785300E-19
 C 5 = -.1180343900E-25

65

ASPHAERE AN FLAECHE 164

RADIUS = -1171.67140
 ASPHAEREN-PARAMETER

EX = -43.9450720000
 C 1 = -.1296719200E-07
 C 2 = -.4906161200E-10
 C 3 = .4653793500E-14
 C 4 = -.1412806100E-17
 C 5 = -.1183234800E-25

5

ASPHAERE AN FLAECHE 172

RADIUS = 99.39708
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = .0000000000
 C 1 = .5054268300E-08
 C 2 = .4397062000E-11
 C 3 = .1157142500E-14
 C 4 = .0000000000E+00
 C 5 = -.6830163000E-31
 C 6 = -.1798952100E-25

10

15

ASPHAERE AN FLAECHE 173

20

RADIUS = 116.71967
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = .0000000000
 C 1 = .1364887500E-08
 C 2 = .3273423700E-11
 C 3 = .4566986300E-15
 C 4 = .5735576000E-18
 C 5 = -.7017743300E-31
 C 6 = -.2443449400E-25

25

30

ASPHAERE AN FLAECHE 176

RADIUS = -192.91501
 ASPHAEREN-PARAMETER
 EX = 4.9528308000
 C 1 = .3306922300E-07
 C 2 = .6088797000E-11
 C 3 = .6041457400E-15
 C 4 = .3208686500E-19
 C 5 = .6892924800E-23

35

40

Patentansprüche

1. Katadioptrisches Objektiv (L1), mit

45

- einer ersten Linsengruppe (G11) mit negativer Brechkraft,
- einem ersten Konkavspiegel (M1) mit einer zentralen Aussparung (B1),
- einem zweiten Konkavspiegel (M2) mit einer zentralen Aussparung (B2),
- einer zweiten Linsengruppe (G12) mit negativer Brechkraft,

wobei alle optischen Komponenten zentriert zu einer gemeinsamen optischen Achse (A) angeordnet sind,

50

wobei die erste Linsengruppe (G11) die Linsen vor dem ersten Konkavspiegel (M1) umfaßt,

wobei der erste und zweite Konkavspiegel (M1, M2) einander zugewandt angeordnet sind,

wobei die zweite Linsengruppe (G12) die Linsen nach dem zweiten Konkavspiegel (M2) umfaßt,

dadurch gekennzeichnet,

daß in einer der zwei Linsengruppen (G11, G12) mindestens eine asphärische Linsenfläche (12, 22, 27, 33, 48, 53, 66, 78) vorgesehen ist.

55

2. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Linsengruppe (G11) mindestens eine erste Negativlinse (26/27) aufweist und sich zwischen dieser ersten Negativlinse und dem ersten Konkavspiegel (M1) keine weiteren Negativlinsen befinden und die Brechkraft der ersten Negativlinse (26/27) und der gegebenenfalls weiteren Linsenelemente bis zum ersten Konkavspiegel (M1) insgesamt negativ ist, daß die zweite Linsengruppe (G12) mindestens eine zweite Negativlinse (33/34) aufweist und sich zwischen dem zweiten Konkavspiegel (M2) und dieser zweiten Negativlinse (33/34) keine weiteren Negativlinsen befinden und die Brechkraft der zweiten Negativlinse (33/34) und der gegebenenfalls weiteren Linsenelemente zwischen zweitem Konkavspiegel (M2) und dieser zweiten Negativlinse (33/34) insgesamt negativ ist, und daß die erste Negativlinse (26/27) oder eine benachbarte Linse und/oder die zweite Negativlinse (33/34) oder eine benachbarte Linse mindestens eine asphärische Linsenfläche (27, 33) aufweisen.

60

65

3. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1-2, dadurch gekennzeichnet, daß eine objekt- und/oder bildseitige Feldlinsengruppe (FL11, FL12) vorgesehen ist und wobei in der objektseitigen und/

oder bildseitigen Feldlinsengruppe (FL11, FL12) mindestens eine asphärische Linsenfläche (12, 48) vorgesehen ist.

4. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–3, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Linsengruppe (G11) aus drei Untergruppen (G111, G112, G113) besteht, von denen die erste und dritte Untergruppe (G111, G113) negative Brechkraft, die zweite Untergruppe (G112) positive Brechkraft aufweisen und daß in der zweiten Untergruppe (G112) mindestens eine asphärische Fläche (12) angeordnet ist.

5. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–4, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtstrahlen die erste und zweite Linsengruppe (G11, G12) nur in einer Richtung durchsetzen.

6. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–5, dadurch gekennzeichnet, daß der Betrag des Abbildungsmaßstabs des katadioptrischen Objektivs (L1) im Bereich von 0,7 bis 1,3 liegt.

7. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–6, dadurch gekennzeichnet, daß sich Linsen oder zumindestens Linsenteile (26/27, 33/34) der ersten und/oder zweiten Linsengruppe (G11, G12) im Bereich zwischen erstem und zweiten Konkavspiegel (M1, M2) befinden.

8. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–7, dadurch gekennzeichnet, daß in der ersten und/oder zweiten Linsengruppe (G11, G12) mindestens eine Konkavfläche (24, 36) vorgesehen ist, bei der das Verhältnis Linsenlänge h_{\max} zu Flächenradius R im Bereich von $0.7 < h_{\max}/R < 1.0$ liegt.

9. Katadioptrisches Objektiv (L1) mit mindestens einer Linse (26/27, 33/34) mit einer Konkavfläche (24, 36) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß diese Linse (26/27, 33/34) oder eine benachbarte Linse eine asphärische Linsenfläche (27, 33) aufweist.

10. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–9, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und/oder zweite Linsengruppe (G11, G12) mindestens eine ausgezeichnete Fläche (27, 33) mit einem größten Betrag des Sinus des Auftreffwinkels gegen die Flächennormale eines Randstrahls in Luft ($\sin(i_{\text{Rand}})$) größer als das 3-fache, vorzugsweise größer als das 3.5-fache, besonders bevorzugt größer als das 3.75-fache der objektseitigen numerischen Apertur (NAO) aufweist.

11. Katadioptrisches Objektiv (L1) mit mindestens einer Linse (26/27, 33/34) mit einer ausgezeichneten Fläche (27, 33) nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß diese Linse (26/27, 33/34) oder eine benachbarte Linse eine asphärische Linsenfläche (27, 33) aufweist.

12. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–11, dadurch gekennzeichnet, daß die Aperturobskuration aufgrund der Spiegelaussparungen (B1, B2) kleiner 35%, vorzugsweise kleiner 25%, besonders bevorzugt kleiner 20% ist.

13. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–12, dadurch gekennzeichnet, daß sich im Lichtweg zwischen den Konkavspiegeln (M1, M2) eine erste Blendenebene (AS1) befindet.

14. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–13, dadurch gekennzeichnet, daß für die Höhe h_{G11} des Randstrahls auf der dem ersten Konkavspiegel (M1) benachbarten Linse (26/27) der ersten Linsengruppe (G11) und für die Höhe h_{G12} des Randstrahls auf der dem zweiten Konkavspiegel (M2) benachbarten Linse (33/34) der zweiten Linsengruppe (G12) gilt:

$$0.8 < h_{G11}/h_{G12} < 1.2$$

15. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–14, dadurch gekennzeichnet, daß ein Aperturstrahl vor der ersten Linsengruppe (G11) einen Winkel von i_1 und nach der ersten Linsengruppe einen Winkel von i_2 mit der optischen Achse einschließt und die Aperturaufweitung

$$\frac{|\sin(i_2)|}{|\sin(i_1)|}$$

mindestens 2,0, vorzugsweise mindestens 3,0, beträgt.

16. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Aperturaufweitung abhängig vom Winkel i_1 des Aperturstrahls vor der ersten Linsengruppe (G11) ist.

17. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Aperturaufweitung für einen paraxialen Aperturstrahl m_p und die Aperturaufweitung für einen Randstrahl m_R beträgt, und dadurch gekennzeichnet, daß $m_R/m_p < 1.1$, vorzugsweise $m_R/m_p < 1.05$, besonders bevorzugt $m_R/m_p < 1.02$ ist.

18. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–17, dadurch gekennzeichnet, daß h_{L1} die maximale Höhe aller Linsenelemente der ersten und zweiten Linsengruppe (G11, G12) und h_{M1} die kleinere Höhe der beiden Konkavspiegel (M1, M2) bezeichnet und dadurch gekennzeichnet, daß h_{L1}/h_{M1} kleiner 1/4, vorzugsweise kleiner 1/5 ist.

19. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–18, dadurch gekennzeichnet, daß die maximale Abweichung der objektseitigen realen Pupillenfunktion von einer Ausgleichsgeraden durch diese Pupillenfunktion kleiner ± 10 mrad, bevorzugt kleiner ± 5 mrad ist.

20. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–19, dadurch gekennzeichnet, daß alle Linsen aus einem Material bestehen.

21. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß alle Linsen aus Fluorid-Kristall, insbesondere CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 , LiF, NaF, KF bestehen.

22. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach mindestens einem der Ansprüche 1–21, dadurch gekennzeichnet, daß sich im Raum zwischen den Konkavspiegeln (M1, M2) ein Gas befindet, dessen Druck- und Temperaturabhängigkeit kleiner ist als bei Stickstoff.

23. Katadioptrisches Objektiv (L1) nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß das Gas Helium ist.

24. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv mit mindestens

- einem ersten Teilobjektiv (L1),
- einer Zwischenbildebene (IMI),
- einem zweiten Teilobjektiv (L2),

dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Teilobjektive (L1, L2) zentriert zu einer gemeinsamen optischen Achse (A) angeordnet sind, und daß ein Teilobjektiv (L1) ein katadioptrisches Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-23 ist, das andere ein rein refraktives Objektiv (L2) ist. 5

25. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß der Betrag des Abbildungsmaßstabs im Bereich von 0.1 bis 0.5 liegt.

26. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 24 und 25, dadurch gekennzeichnet, daß das refraktive Teilobjektiv (L2) mindestens eine asphärische Fläche (53, 66, 78, 151, 164, 172, 173, 176) enthält. 10

27. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß das refraktive Teilobjektiv (L2) eine zweite Blendenebene (AS2) enthält und eine erste asphärische Fläche (66) vor und eine zweite asphärische Fläche (78) hinter der zweiten Blendenebene (AS2) angeordnet ist und daß h_{a1} die Höhe eines Hauptstrahls an der ersten asphärischen Fläche (66), h_{a2} die Höhe eines Hauptstrahls an der zweiten asphärischen Fläche (78) bezeichnet und daß 15

$$0,7 < \left| \frac{h_{a1}}{h_{a2}} \right| < 1,3, \quad 20$$

bevorzugt

$$0,8 < \left| \frac{h_{a1}}{h_{a2}} \right| < 1,2, \quad 25$$

gilt.

28. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 24-27, dadurch gekennzeichnet, daß es zwei benachbarte asphärische Linsenflächen (172, 173) aufweist. 30

29. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, daß sich zwischen den benachbarten asphärischen Linsenflächen (172, 173) ein Medium mit einem Brechungsindex $< 1,1$ befindet.

30. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 28 und 29, dadurch gekennzeichnet, daß h_{a3} die maximale Strahlhöhe der Hauptstrahlen an den benachbarten asphärischen Linsenflächen (172, 173) und h_{AS} die Höhe der Systemblende (AS2') bezeichnet und 35

$$\frac{h_{a3}}{h_{AS}} < 0,15,$$

bevorzugt

$$\frac{h_{a3}}{h_{AS}} < 0,10, \quad 40$$

gilt.

31. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 24-30, dadurch gekennzeichnet, daß in der objektseitigen Feldlinsengruppe (FL21) des refraktiven Teilobjektivs (L2) eine asphärische Linsenfläche (53) angebracht ist. 45

32. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 24-31, dadurch gekennzeichnet, daß h_{L2} die maximale Höhe aller Linsenelemente des ersten und zweiten Teilobjektivs (L1, L2) und h_{M2} die kleinere Höhe der beiden Konkavspiegel (M1, M2) bezeichnet und dadurch gekennzeichnet, daß h_{L2}/h_{M2} kleiner 1/4, vorzugsweise kleiner 1/5 ist. 50

33. Katadioptrisches Reduktionsobjektiv nach mindestens einem der Ansprüche 24-32, dadurch gekennzeichnet, daß alle Linsen aus einem Material bestehen.

34. Katadioptrisches Objektiv nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, daß alle Linsen aus Fluorid-Kristall, insbesondere CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 , LiF , NaF , KF bestehen. 55

35. Mikroskop mit einem Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-34.

36. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einem Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1-34.

37. Verwendung eines Objektivs nach mindestens einem der Ansprüche 1-34 in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage. 60

38. Verfahren zur Herstellung mikrostrukturierter Bauteile, bei dem ein mit einer lichtempfindlichen Schicht versehenes Substrat mittels einer Maske und einer Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 36 durch ultraviolettes Licht belichtet wird und mittels einer Abbildung eines auf der Maske enthaltenen Musters strukturiert wird. 65

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

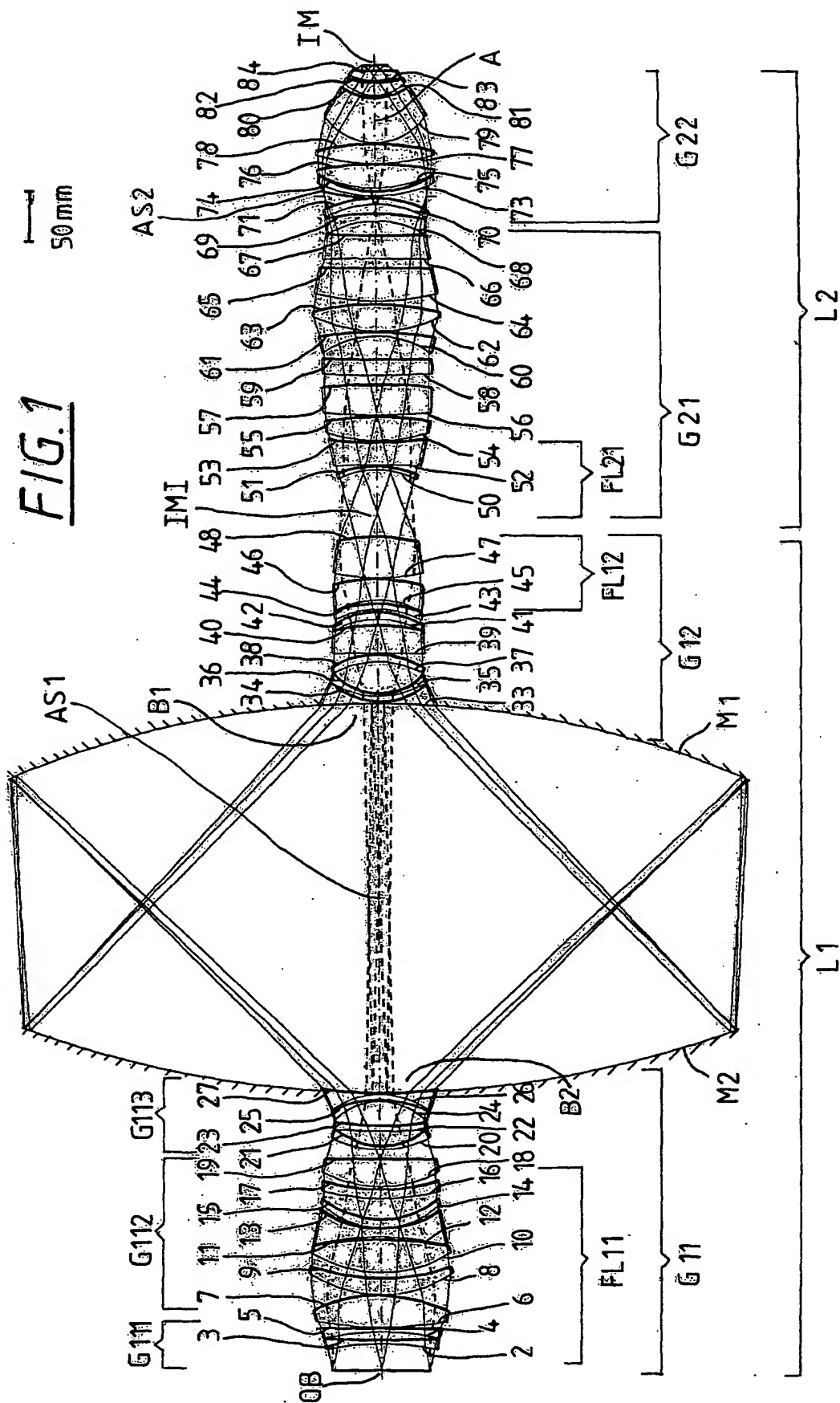


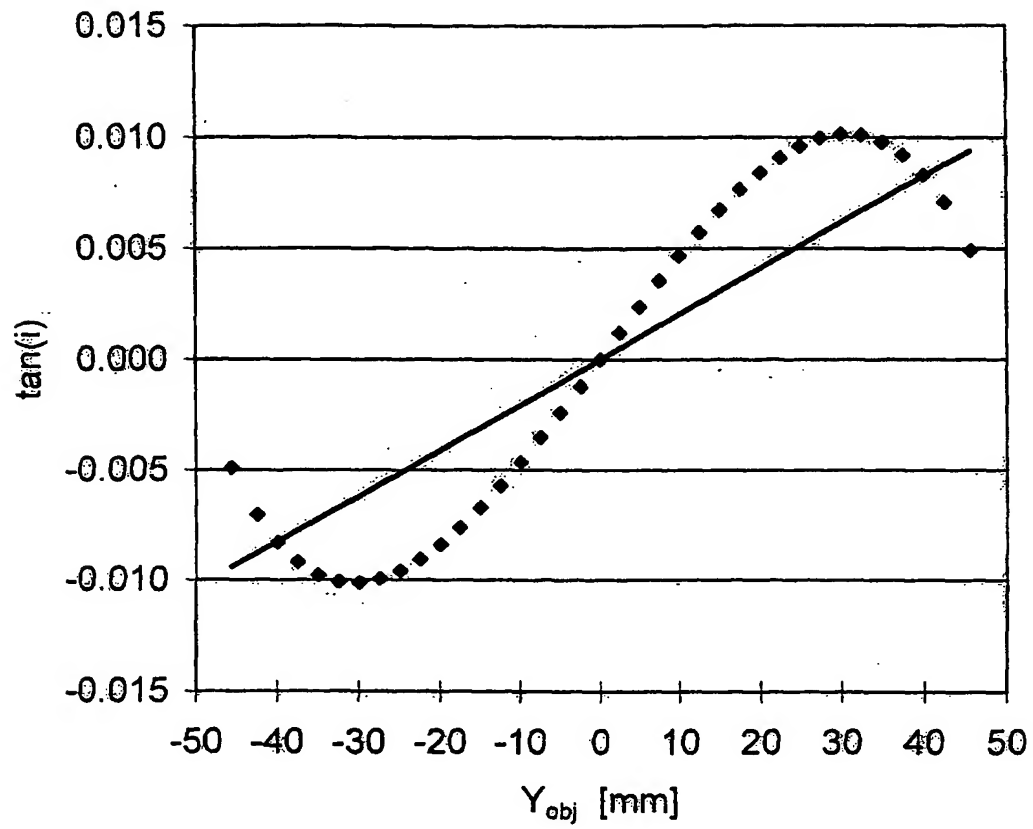
FIG. 2

FIG. 3

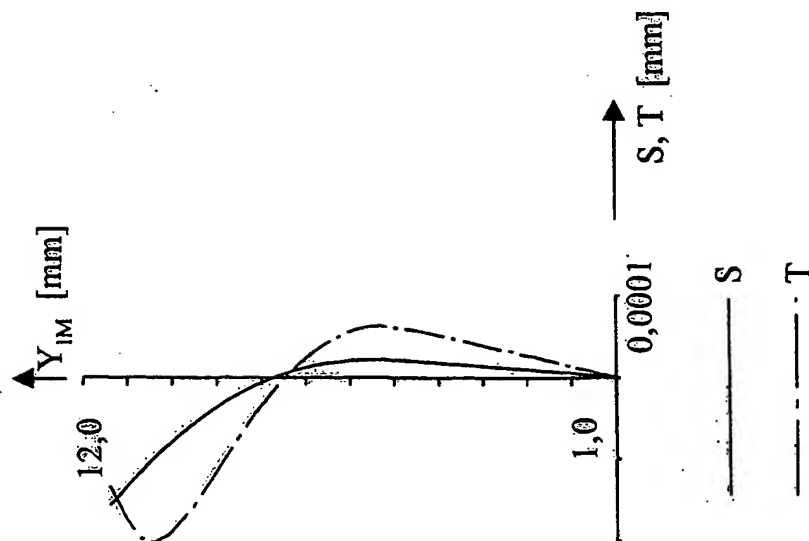
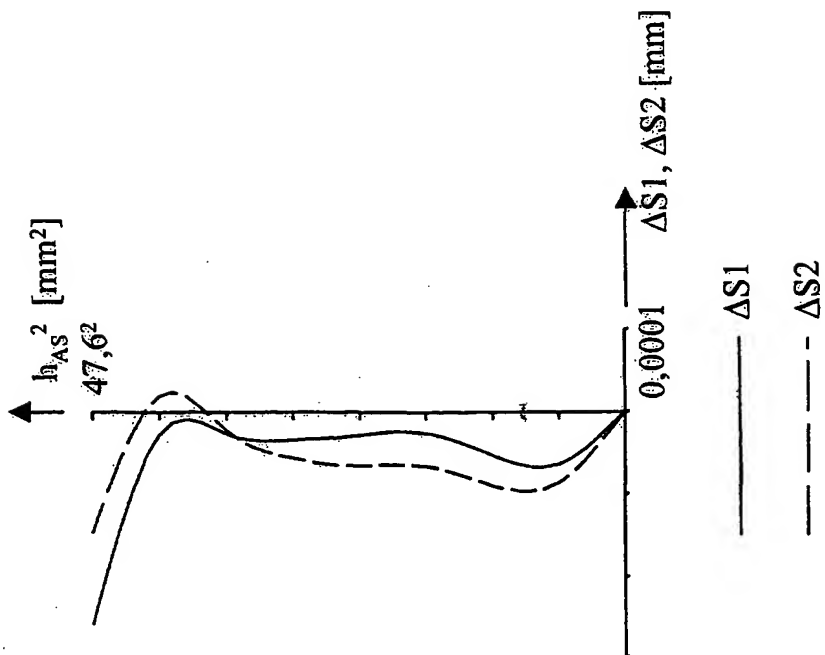


FIG. 4



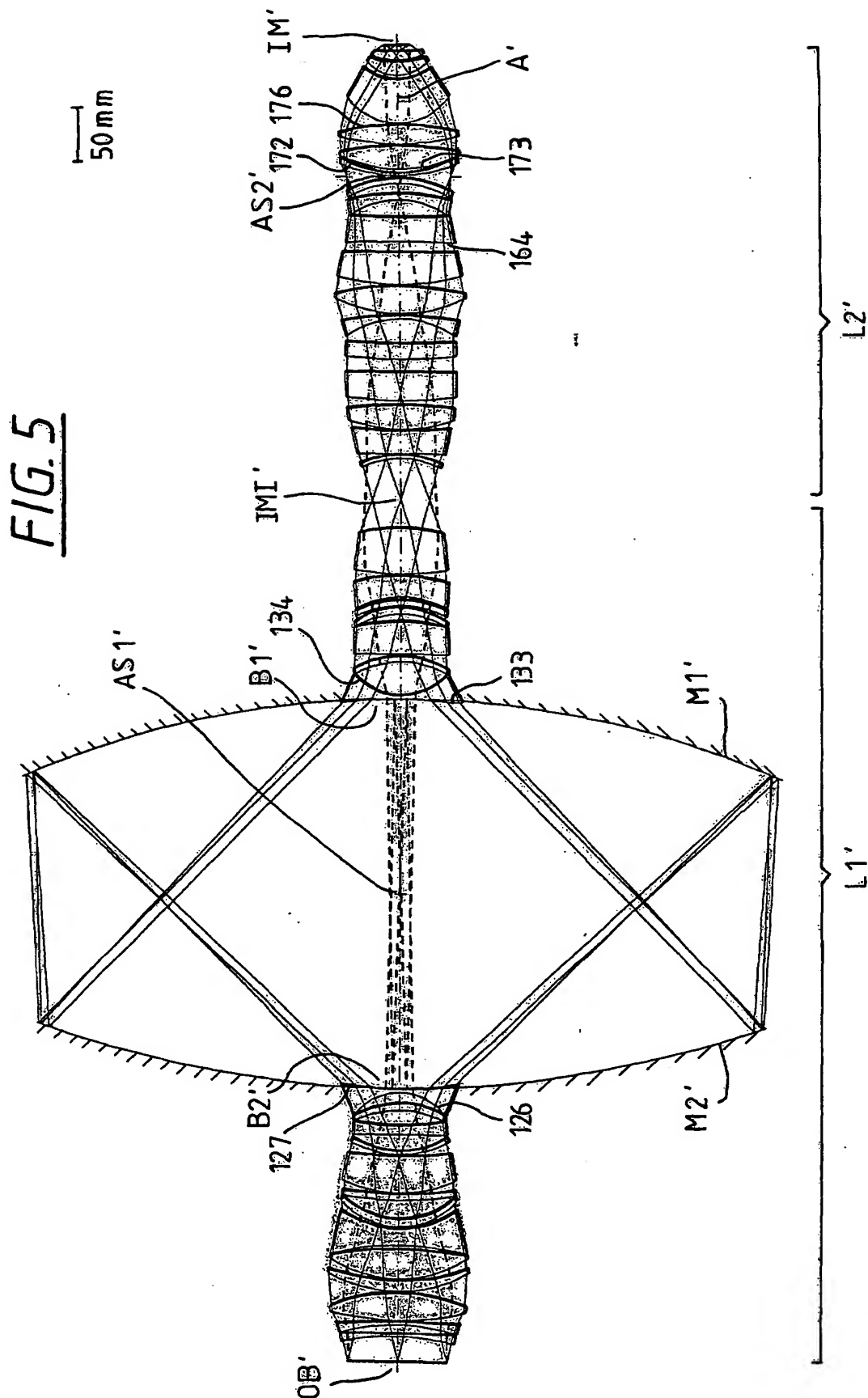


FIG. 6

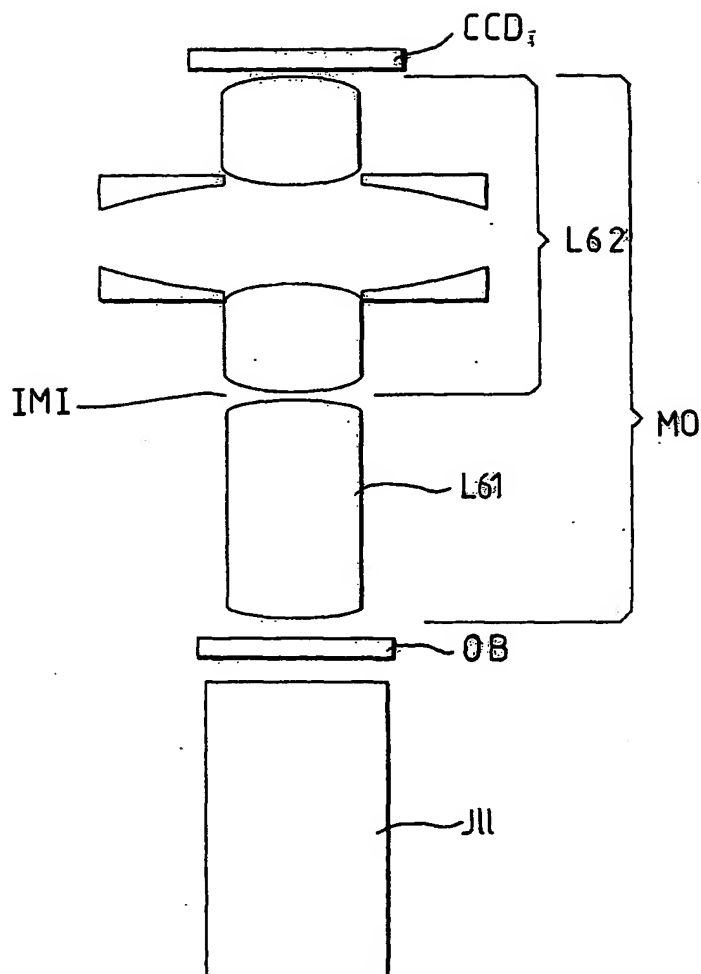


FIG. 7

